J. HECHT / D. TERESI

EL RAYO LASER

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

Jeff Hecht / Dick Teresi

EL RAYO LASER

SALVAT

Versión española de la edición original norteamericana de la obra *Láser*

Traducción: Enric Tremps

Edición digital: Sargont (2018)

ISBN 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN 84-345-8442-5
Depósito Legal NA-24-87
Publicada por Salvat Editores, S.A. - Mallorca, 41-49 — Barcelona
Impresa por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

INDICE DE CAPITULOS

1. INTRODUCCION. LA SUPERHERRAMIENTA

En *La guerra de los mundos*, de H.G. Wells, publicada en 1898, unos seres extraterrestres siembran la destrucción en nuestro planeta con su «rayo calorífico», cuya energía era tan ardiente y poderosa que destruía cuanto tocaba. «De repente apareció un resplandor luminoso», escribió Wells, «que se desplazaba de un lado a otro con rapidez y firmeza como flamígero rayo de la muerte, como invisible, inevitable espada de fuego». El rayo calorífico de Wells, que ha inspirado a varias generaciones de autores de ciencia- ficción con sus numerosas descripciones de pistolas luminosas y rayos mortíferos, constituye un escalofriante presagio de los planes para utilizar el láser infrarrojo de alta potencia como arma.

Cuando en 1960 aparecieron finalmente los láseres, escritores y productores cinematográficos concentraron de inmediato su atención en su poder destructivo y sustituyeron la palabra «láser» por pistola lanzarrayos. El láser era uno de los principales aparatos en la película de aventuras y espionaje de James Bond titulada *Goldfinger*, a principios de los años 60. Sin duda, recordarán a Bond (papel interpretado en aquella época por Sean Connery), atado sobre una mesa metálica por el malvado Goldfinger, con las piernas separadas, mientras un rayo láser avanza directamente hacia sus genitales. El brillante y grueso rayo rojo abría con facilidad un profundo surco en la mesa. Ni que decir tiene que habría dividido su cuerpo sin dificultad alguna.

Ésta es, pues, la imagen más popular del láser: la pistola luminosa, el rayo de la muerte. En efecto, ciertos láseres son capaces de cortar metal y otros pueden utilizarse como armas. Sin embargo, en nuestra sociedad la imagen popular del láser refleja ante todo el cariz espectacular de las obras de ficción, más que sus posibilidades reales. La mayoría de los láseres son incapaces de cortar o quemar y proyectan a lo sumo débiles y finos rayos de luz, ligeramente dispersados por el polvo. La nitidez de las ilustraciones que aparecen en este libro se ha obtenido proyectando haces de luz láser a través de nubes de humo, donde se dispersa la suficiente cantidad de luz para ser vista y fotografiada.

¿Cómo debemos imaginarnos, por tanto, el láser? Lo más sencillo es que lo veamos como una herramienta que se sirve de la luz en lugar de la

energía mecánica. Una herramienta que permite al operador controlar la forma y la cantidad de energía dirigida a un lugar determinado. Con láser se puede cortar una plancha de acero de cinco centímetros de espesor o detectar un solo átomo. Se pueden llevar a cabo tareas tan espectaculares como la de generar una reacción de fusión termonuclear u otras tan aparentemente nimias como la de taladrar tetillas de biberones.

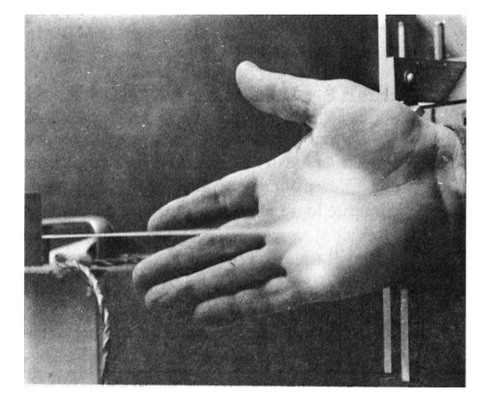
¿QUÉ ES UN LÁSER?

Un láser es un aparato (o dispositivo) que produce un tipo muy especial de luz. Podemos imaginárnoslo como una superlinterna. Sin embargo, la luz procedente de un láser se diferencia de la de una linterna en cuatro aspectos básicos:

1) La luz láser es *intensa.* No obstante, sólo ciertos láseres son *potentes.* Aunque lo parezca, no se trata de una contradicción. La intensidad es una medida de la potencia por unidad de superficie, e incluso los láseres que emiten sólo algunos milivatios son capaces de producir una elevada intensidad en un rayo de un milímetro de diámetro. En realidad, su intensidad puede ser igual a la de la luz del sol. Cualquier lámpara ordinaria emite una cantidad de luz muy superior a la de un pequeño láser, pero esparcida por toda la sala. Algunos láseres pueden producir muchos miles de vatios continuamente; otros son capaces de producir billones de vatios en un impulso cuya duración es tan sólo la mil millonésima parte de un segundo.

2) Los haces láser son estrechos y no se dispersan como los demás haces de luz. Esta cualidad se denomina *direccionalidad.* Se sabe que ni la luz de un potente foco logra desplazarse muy lejos: si se enfoca hacia el firmamento, su rayo parece desvanecerse de inmediato. El haz de luz comienza a esparcirse en el momento en que sale del foco, hasta alcanzar tal grado de dispersión que llega a perder su utilidad. Sin embargo, se han logrado reflejar haces láser de pocos vatios de potencia sobre la luna y su luz era todavía lo suficientemente brillante para verla desde la tierra. Uno de los primeros haces láser que se disparó contra la luna en 1962 sólo llegó a dispersarse cuatro kilómetros sobre la superficie lunar. ¡No está mal si se considera que se había desplazado cuatrocientos mil kilómetros!

El láser que aparece en la película Goldfinger es un instrumento de destrucción... Movie Star News



...sin embargo, muchos láseres son perfectamente inofensivos, como lo demuestra este modelo de la Associated Press. No sólo no causa daño alguno, sino que ni siquiera se percibe en la mano. El rayo es portador de información codificada que se utiliza para reproducir fotografías. Wide World Photos

3) La luz láser es *coherente.* Esto significa que todas las ondas luminosas procedentes de un láser se acoplan ordenadamente entre sí. Una luz corriente, como la procedente de una bombilla, genera ondas luminosas que comienzan en diferentes momentos y se desplazan en direcciones diversas.

Algo parecido a lo que ocurre cuando se arroja un puñado de piedrecitas en un lago. Lo único que se crean son pequeñas salpicaduras y algunas ondulaciones. Ahora bien, si se arrojan las mismas piedrecitas una a una con una frecuencia exactamente regular y justo en el mismo sitio, puede generarse una ola en el agua de mayor magnitud. Así actúa un láser, y esta propiedad especial puede tener diversas utilidades. Dicho de otro modo, una bombilla o un foco son como escopetas de cartuchos, mientras que un láser equivale a una ametralladora.

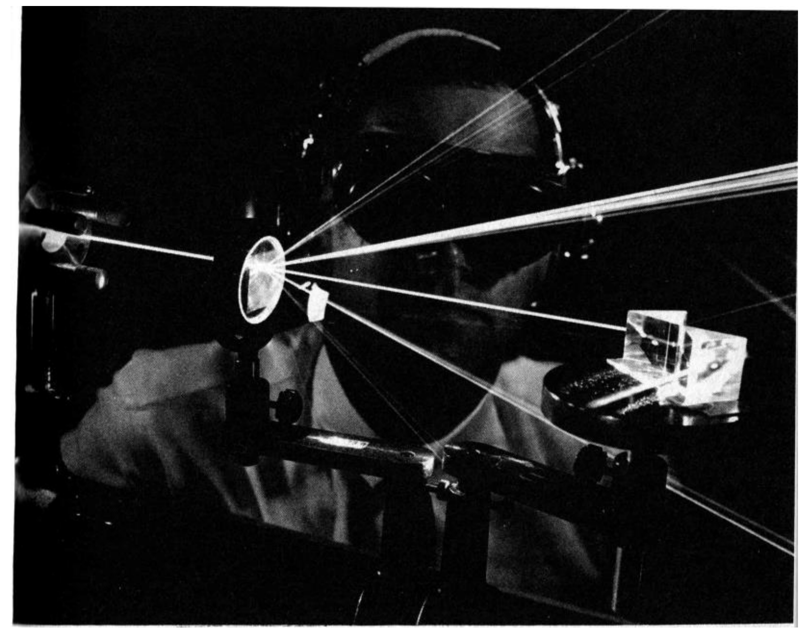
4) Los láseres producen luz de un solo color, o para decirlo técnicamente, su luz es *monocromática.* La luz común contiene todos los colores de la luz visible (es decir, el *espectro),* que combinados se convierten en blanco. Los haces de luz láser han sido producidos en todos los colores del arco iris (si bien el más común es el rojo), y también en muchos tipos de luz invisible; pero un láser determinado sólo puede emitir única y exclusivamente un solo color. Existen láseres sintonizables que pueden ser ajustados para producir diversos colores, pero incluso éstos no pueden emitir más que un color único en un momento dado. Determinados láseres, pueden emitir varias frecuencias monocromáticas al mismo tiempo, pero no un espectro continuo que contenga todos los colores de la luz visible como pueda hacerlo una bombilla. Además, existen numerosos láseres que proyectan luz invisible, como la infrarroja y la ultravioleta.

En el capítulo siguiente se hablará con más extensión de estas cualidades del láser, es decir: la intensidad, la direccionalidad, la coherencia y la monocromaticidad.

¿PARA QUÉ SIRVEN LOS LÁSERES?

La gama de usos de los láseres es sorprendente, hasta el punto de que alcanza una extensión mucho más amplia que la concebida originariamente por los científicos que diseñaron los primeros modelos (a pesar de

que difícilmente lo admitirían), y supera en mucho la visión de los primeros escritores de ciencia ficción, quienes en la mayoría de los casos sólo supieron ver en él un arma futurista, (aunque tampoco parecen dispuestos a confesar su falta de imaginación).



Los rayos láseres son extremadamente intensos y direcciónales, es decir, son como focos de gran potencia cuyos haces de luz son capaces de recorrer enormes distancias sin dispersarse. Por consiguiente, con la ayuda de espejos, prismas y unos elementos ópticos especiales denominados «láminas semitransparentes» podremos dividirlos, reflejarlos y dirigirlos hacia donde deseemos. La fotografía muestra un modelo de argón que puede utilizarse para medir distancias, transmitir sonido e información visual y grabar planchas de impresión y hologramas. Hughes Aircraft Company

También resulta sorprendente la gran variedad de láseres existentes. En un extremo de la gama se encuentran los láseres fabricados con minúsculas pastillas semiconductoras, similares a las utilizadas en circuitos electrónicos, con un tamaño no superior al de un grano de sal. Gordon Gould, uno de los pioneros en este campo, confesó que le impresionaron

cuando fueron presentados. En el extremo opuesto se encuentran los láseres bélicos del tamaño de un edificio, con los que experimenta actualmente el ejército, muy diferentes de las pistolas lanzarrayos que habían imaginado los escritores de ciencia-ficción.

En este libro no sólo nos hemos propuesto hablar de los láseres, sino también explicar sus actuales aplicaciones —así como las de un futuro próximo— y la forma en que afectarán, por consiguiente, nuestras vidas. Las tareas desempeñadas por los láseres van de lo mundano a lo esotérico, si bien comparten un elemento común: son difíciles o totalmente imposibles con cualquier otro instrumento. Los láseres son unos aparatos relativamente caros y, por lo general, sólo se utilizan por su propiedad de suministrar la forma y la cantidad de energía requeridas en el lugar deseado. Charles H. Townes, uno de los inventores del láser y ganador del Premio Nobel, ha dicho que, en su opinión, el láser «abarcará una gama muy amplia de campos y logrará hacerlo prácticamente todo. Pero es caro: ésa es su única limitación».

EL BISTURÍ DE 50.000 DÓLARES Y LAS FIBRAS TELEVISIVAS

Un típico láser quirúrgico, por ejemplo, cuesta entre 30.000 y 50.000 dólares, es decir, un coste unas mil veces superior al de un buen bisturí convencional. Y debemos admitir sinceramente que, para muchas operaciones, la utilidad del bisturí es superior a la del láser. Sin embargo, una persona a la que se le hubiese desprendido la retina, condición que puede conducir a la ceguera, sin duda se alegraría de la existencia de esos caros bisturíes. Con un láser se logra lo que no se conseguiría con un instrumento cortante: soldar de nuevo la retina en el globo ocular. Para llevar a cabo tan delicada operación, que puede tener lugar en el propio consultorio, no es necesario practicar incisión alguna. El rayo láser atraviesa el cristalino del ojo del paciente y se focaliza sobre la retina, produciendo una pequeña lesión que contribuye a que se una al glóbulo ocular. Por exótico que parezca, se ha estandarizado un tratamiento similar por medio del láser para curar la ceguera causada por la diabetes. (A Charles Townes, esta aplicación le parece asombrosa. Recientemente nos confesó que la adaptación de láser para usos médicos le había sorprendido, en especial el procedimiento utilizado para fijar la retina.)

Es probable que ustedes no hayan entrado en contacto personalmente con el láser a través de la medicina (lo sabrían si así fuese), pero no cabe duda de que se han servido ya de comunicaciones por láser. Si vieron los Juegos Olímpicos de Invierno de 1980 que tuvieron lugar en Lake Placid, Nueva York, o han mirado alguna retransmisión televisada recientemente de un partido de fútbol desde el estadio de Tampa Bay, en Florida, han contemplado imágenes que, en parte de su recorrido, han sido transmitidas por láser. Existen docenas de lugares en Estados Unidos donde se utilizan láseres para transmitir las señales telefónicas. En ambos casos, la luz procedente de los láseres se desplaza a lo largo de fibras de cristal tan finas como un cabello, denominadas fibras ópticas, cuya tecnología podría introducir en su casa una multitud de nuevos medios de comunicación.

LOS RAYOS DE LA MUERTE, LOS TALADROS, LA FUSION NUCLEAR

Los láseres se han convertido en instrumentos de uso común en el ejército, pero tal vez no en la forma imaginada. En el terreno militar, su función principal consiste en calcular la distancia y localizar el objetivo, pero no como arma lanzarrayos. Los láseres miden la distancia a que se encuentran los objetivos o los señalan con una «diana«, contribuyendo a que las bombas, o los misiles alcancen el blanco enemigo. También es cierto que, como ya anticipó H.G. Wells, el ejército de Estados Unidos gasta unos 300 millones de dólares anuales en la construcción de láseres capaces de destruir desde simples helicópteros hasta misiles balísticos y satélites. En la Unión Soviética existe un programa semejante, y se cree que han logrado servirse ya de un láser para cegar temporalmente los sensitivos «ojos» electrónicos de un satélite espía de Estados Unidos.

En las fábricas de todo el mundo se ha generalizado el uso de los láseres para taladrar diamantes, identificar piezas automotrices y soldar la envoltura de las pilas utilizadas para los marcapasos cardíacos. «Inspectores» láser de control de calidad vigilan minuciosamente las cadenas de montaje, para asegurarse de que el tamaño de las piezas fabricadas se mantiene dentro del margen aceptable.

Se espera que una de las soluciones a nuestro problema energético lo constituya la *fusión termonuclear,* consistente en el proceso a través del cual genera el sol su energía. Una forma de crear dicha fusión en la tierra estriba en calentar y comprimir partículas que contengan hidrógeno hasta alcanzar las temperaturas y presiones necesarias para que lleguen a unirse los núcleos de los átomos de hidrógeno, convirtiéndose en minúsculas bombas de hidrógeno y generando, por consiguiente, una increíble cantidad de energía. ¿Con qué pueden comprimirse dichas partículas? Evidentemente con láseres.

IMÁGENES TRIDIMENSIONALES Y EXTRAORDINARIOS LECTORES

Los láseres permiten que existan los *hologramas,* esas imágenes tridimensionales que parecen flotar suspendidas en pleno espacio. Sin embargo, la holografía tiene también muchas aplicaciones de utilidad práctica, desde verificar la calidad de los neumáticos de avión hasta medir el flujo calorífico, o contribuir al diseño de secadores para el pelo.

Los láseres han abierto nuevas perspectivas en los mundos del arte y del espectáculo incluso más allá de la holografía. Los juegos de luces láser, el más conocido de los cuales es el *Laserium,* han sido presenciados por millones de espectadores en el mundo entero. Además el láser es la pieza clave de uno de los modelos de reproductores de video, cuyas películas o programas de televisión han sido grabados previamente en un disco fonográfico.

Los láseres son capaces de leer. Los códigos secretos que aparecen en los paquetes de alimentos de los supermercados son reconocidos por el rayo láser, y la información descifrada por un ordenador electrónico en las oficinas del almacén. De este modo, no sólo se registra automáticamente el precio de la mercancía en la caja, sino que, además se ajusta el inventario en la memoria de la computadora. Con láser se pueden también leer caracteres de máquinas de escribir especiales, de forma que se compongan los manuscritos sin intervención humana.

Los láseres son, a su vez, capaces de escribir. Para una computadora es fácil controlar un láser de forma que escriba sobre una película, papel especial o el rodillo de una multicopista, como etapa previa a la impre-

sión sobre papel. Con láser podemos grabar las planchas que se utilizan para imprimir los periódicos, e imprimir las hojas de balance de las compañías de seguros y de los Bancos y Cajas de Ahorro.

MIL MILLONES DE DÓLARES ANUALES

Los láseres se aplican asimismo al campo de la investigación científica. Sería preciso escribir un libro tan extenso como el que nos ocupa para detallar sus múltiples usos. Por medio del láser se pueden crear y controlar reacciones químicas, e incluso cabe la posibilidad de que algún día se utilicen para propulsar cohetes y aviones. Se hablará de estos aspectos en las páginas que siguen.

La lista de las maravillosas aplicaciones del láser aumenta día a día, al igual que su próspera industria. Las ventas de láseres y equipos accesorios alcanzaron por primera vez la cifra de mil millones de dólares en 1980. Esta cantidad, en la que no se incluyen las considerables sumas invertidas por la Unión Soviética y China, representa casi el doble del total de ventas de Estados Unidos en 1977.

Al láser le queda, sin embargo, mucho camino por recorrer; sus posibilidades apenas comienzan a ser explotadas. A pesar de que la cifra de mil millones de dólares pueda parecer impresionante, es muy inferior al total de ventas anuales de muchas compañías prácticamente desconocidas. Para citar un ejemplo conocido, tomemos el caso de la RCA, cuyas ventas de servicios y mercancías alcanzaron la cifra de 7 500 millones de dólares en 1979.

En los capítulos siguientes hablaremos de los láseres, de sus aplicaciones, de sus posibilidades y de los problemas que deben superarse. No pretendemos confundirles al acentuar los problemas; somos realistas pero no pesimistas. Les engañaríamos si presumiéramos de que no existe problema alguno. Esa es precisamente la razón por la que las nuevas y espectaculares aplicaciones del láser no han cambiado ya de manera más radical nuestras vidas.

Los obstáculos que hay que superar, requieren técnicas complejas y elaboradas, o la simple y genial inspiración que conduce a los descubrimientos. Con anterioridad nos hemos enfrentado a obstáculos similares y hemos sabido superarlos. Así es como hemos llegado al estadio actual.

Lo que vamos a relatarles es la historia del láser, sus orígenes, las ventajas que nos aporta y hasta dónde puede conducirnos.

Antes de comenzar, querríamos explicar la disposición de este libro. Lo hemos compaginado de forma que el lector no se vea obligado a leer todos y cada uno de los capítulos, sino que pueda elegir aquellos en los que se hable de aplicaciones del láser que le interesen en especial. Sin embargo, recomendamos la lectura previa del capítulo segundo, LASERES: QUÉ SON Y CÓMO FUNCIONAN, puesto que, conociendo su funcionamiento, se comprenderá con mayor facilidad el resto del libro. Los capítulos tercero y cuarto, en los que se habla respectivamente de los diferentes tipos de láseres y de las biografías de sus inventores, son informativos pero no esenciales para quienes deseen conocer sus diversas aplicaciones sin pérdida de tiempo.

He aquí, pues, la historia del láser: su pasado, su presente y su futuro.

2. LASERES: QUÉ SON Y CÓMO FUNCIONAN

En los siguientes capítulos se hablará del láser como si se tratase simplemente de un tipo especial de bombilla, capaz de producir una luz muy singular. Sin embargo, en éste nos formaremos una idea de lo qué es y de cómo funciona.

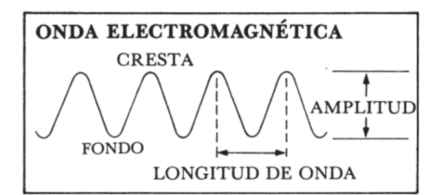
La palabra láser está formada por siglas que corresponden a las palabras inglesas *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir, «amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación». En este capítulo hablaremos de todos los términos precedentes (aunque no necesariamente en el mismo orden) y aclararemos cómo se combinan para formar un láser. Al mismo tiempo nos ocuparemos de los descubrimientos científicos que han tenido lugar a lo largo de varios siglos, puesto que el láser es la síntesis de la labor de muchos grandes científicos. Entre los iluminados por su rayo se encuentran Newton, Maxwell, Einstein y muchos otros que mencionaremos a continuación.

Comencemos, pues, por el principio.

SU COMIENZO ES LUZ (LA *L* DE L.Á.S.E.R.)

Ya a principios del siglo XVIII, en su obra titulada *Optiks*, Isaac Newton explicó al mundo el comportamiento de la luz. Aclaró, por ejemplo, por qué vemos el arco iris después de la lluvia. Las gotitas de agua actúan como prismas y descomponen la luz en los colores de su espectro. Un prisma o una gotita, dijo Newton, es atravesado por ciertos colores con mayor rapidez que otros de forma que cada uno de ellos emerge con un ángulo ligeramente diferente. En la actualidad, este descubrimiento es todavía importante para quien se dedique a la fabricación de lentes, espejos, o... láseres.

Él tuvo también la genialidad de deducir que la luz, puesto que se desplaza en línea recta, debe estar constituida por un flujo de minúsculas partículas. Con esa definición, Newton entusiasmó a los científicos de su época, pero se ha demostrado que su teoría sólo era correcta en parte.



1. Todas las ondas electromagnéticas, desde las de radio hasta los rayos gamma, son descritas en términos de longitud de onda (la distancia que separa dos crestas consecutivas) y amplitud (altura de la cresta con respecto al fondo).

A principios del siglo XIX se había comprobado que la luz, aunque se desplaza esencialmente en línea recta, no está compuesta tan sólo de pequeñas esferas, sino que se propaga en forma de *ondas*, semejantes a las olas de un lago. Y al igual que éstas, las ondas luminosas pueden tener diferentes *longitudes de onda* (véase el diagrama n.° 1), según la distancia que separe sus crestas, y diferentes alturas o *amplitudes*, de acuerdo con la distancia que medie entre la cresta y el fondo de la onda. Las ondas luminosas pueden tener a su vez diferentes *frecuencias*, según el número de ondas que pase por un punto determinado en un tiempo dado, que por lo general es un segundo. Acaso esta información parezca totalmente gratuita a estas alturas, pero se comprenderá su importancia cuando hablemos más adelante de los diferentes tipos de láseres.

Por cierto, fue un holandés llamado Christian Huygens quien propuso la teoría de las ondas luminosas, varios años antes de que Newton elaborase la teoría de las partículas. Sin embargo en aquella época nadie creyó en las ideas de Huygens. El caso es que tanto Huygens como Newton estaban parcialmente en lo cierto, si bien cometieron también algunos errores. En determinadas ocasiones, la luz se comporta como una onda, y en otras, para complicar las cosas, se comporta como una partícula. Aclararemos esta cuestión más adelante.

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA (¡HE AHÍ LA *R*!)

No obstante, la teoría de las ondas no logró explicarlo todo con relación a la luz. Los científicos iban a encontrarse aún con varias sorpresas relacionadas con este extraño fenómeno.

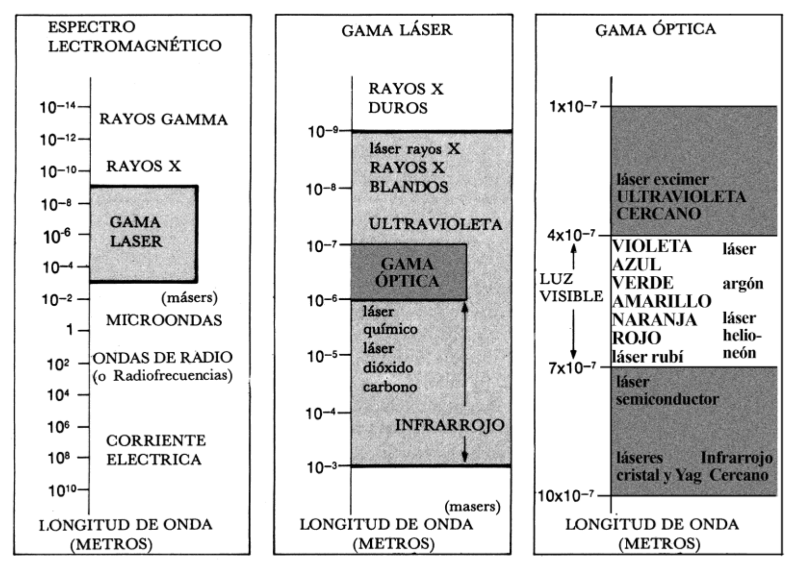
A mediados del siglo XIX, James Clerk Maxwell, físico teórico escocés considerado el Einstein de su época, dedujo que las fuerzas electromagnéticas, entonces de reciente descubrimiento, se propagaban en for-

ma de ondas al igual que la luz. A continuación estableció otra coincidencia: las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz. De acuerdo con sus deducciones, Maxwell se atrevió a sugerir que, así como la luz visible está formada por un espectro de diferentes colores, las ondas electromagnéticas se hallan constituidas por un espectro de ondas diferentes. Del mismo modo, al igual que el color azul no constituye sino una pequeña parte del espectro luminoso, la luz visible no es más que una pequeña parte del espectro electromagnético en general. *Las ondas luminosas son sencillamente ondas electromagnéticas visibles,* concluyó Maxwell, y deben existir, además, numerosas ondas electromagnéticas invisibles.

La vida de Maxwell no fue lo bastante larga para asistir a la verificación de su idea; no obstante, durante la década siguiente Heinrich Hertz descubrió las ondas de radio (o radiofrecuencias), y poco después Wilhelm Roentgen descubría los rayos X. Hoy sabemos que el espectro electromagnético está compuesto de muchos tipos de radiaciones (véase el diagrama N.° 2). Sabemos que las de mayor longitud son las ondas de radio, que pueden alcanzar una longitud de varios kilómetros, como las que se utilizan normalmente para transmisiones radiofónicas de onda media (AM). A continuación figuran las ondas de radio de menor longitud, como la onda corta, las de televisión, las de frecuencia modulada y las microondas. Sin embargo, no hay que engañarse con respecto a los términos de onda corta y microondas; su extensión es simplemente menor que la de las ondas radiofónicas de mayor longitud, que fueron las primeras que se generaron y utilizaron. La longitud de las microondas, por ejemplo, es en realidad de varios centímetros.

Existe una distancia considerable entre la parte del espectro electromagnético donde se encuentran las microondas y la luz visible, cuya longitud de onda es microscópica. La onda de la luz azul, por ejemplo, es de unos 0,0005 (5×10^{-4}) milímetros de longitud. La gama que media entre las microondas y las regiones visibles se halla integrada por radiaciones milimétricas o submilimétricas (el nombre indica su longitud de onda) y la radiación infrarroja (calificativo que significa «inferior al rojo»), cuya característica común consiste en que son todas invisibles. Más allá de la gama visible, entre las ondas de todavía menor longitud, nos encontramos, en primer lugar, con la región ultravioleta (por encima del violeta), seguida de los rayos X y de los rayos gamma, los últimos de

los cuales sólo se producen, por lo general, en los núcleos atómicos y su longitud de onda, de 0,000 000 01 (10^{-8}) milímetros, es tan minúscula que mil millones de ellas ocupan tan solo el espacio de un centímetro.



2. Radiación es *un término ambiguo y frecuentemente mal utilizado que ha llegado a tener un significado siniestro en las mentes populares. Sin embargo, en física,* radiación electromagnética *tiene un significado muy específico, que es importante aclarar para comprender los láseres.*

Hay muchos tipos de radiación electromagnética que se propagan todos a la velocidad de la luz. El más familiar es la luz visible, pero las ondas de radio, las microondas, la radiación infrarroja, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma son también formas de radiación electromagnética, que, como muestra el diagrama, forman un espectro continuo. Las ondas de mayor longitud, como las ondas de radio y la corriente eléctrica, se encuentran en la parte inferior, mientras que en la parte superior aparecen los rayos gamma que son los más cortos.

En este diagrama se ha clasificado la radiación electromagnética según su longitud de onda, pero también es posible servirse de otra escala basada en su frecuencia, es decir el número de ondas que atraviesen un punto determinado en un segundo. La frecuencia de las ondas electromagnéticas aumenta al disminuir su longitud. La mecánica cuántica afirma que la energía de la que son portadoras dichas ondas está agrupada en paquetes denominados fotones y la energía de cada fotón es proporcional a su frecuencia. Esto significa que cuanto menor sea la longitud de onda mayor

será la energía del fotón, debido a lo cual las ondas más cortas -es decir las gamma— son también las más peligrosas.

La *parte oscurecida del espectro electromagnético indica la zona de operación de los láseres y se muestra con mayor detalle en el cuadro central. Nótese que los máseres, definidos algunas veces como láseres que emiten microondas, no operan realmente en la gama normal de los láseres.*

En el cuadro de la derecha se muestra la región óptica que se extiende desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta cercano y en la cual operan muchos láseres. La parte blanca del centro representa la luz visible para el ojo humano. Como se puede comprobar, la luz visible constituye un pequeño fragmento del espectro electromagnético y si bien algunos láseres como los de argón helio-neón y los de rubí emiten luz visible, otros operan en las demás gamas.

Deseamos aclarar que tanto en el diagrama como a lo largo del texto, hemos definido frecuentemente la longitud de onda de diferentes radiaciones por el sistema de notación científica, que consiste en escribir cifras muy grandes o muy pequeñas utilizando un solo número entre el uno y el diez multiplicado por una potencia de diez. Por ejemplo el número 5.500.000 se escribiría de la siguiente forma: $5{,}5 \times 10^{6}$*, es decir 5,5 multiplicado por 10 elevado a la sexta potencia (lo que equivale a añadir 6 ceros), o 5,5 multiplicado por 1.000.000. La misma idea es aplicable a números inferiores a una unidad. Por ejemplo la cifra 0,0000055 se convierte en* $5{,}5 \times 10^{-6}$*, que equivaldría a 5,5, multiplicado por un 1 colocado tantos lugares a la derecha del punto decimal como indique la potencia negativa, es decir 0,000 001.*

Existen también ciertos prefijos estandarizados usados en las medidas científicas y su función es similar a la de la notación descrita. Probablemente todo el mundo esté familiarizado con los términos milímetro (una milésima de metro) y kilómetro (unidad equivalente a 1.000 metros). Dichos prefijos pueden ser utilizados con cualquier unidad de medida. En este libro hemos hecho uso tanto de prefijos como de notaciones científicas. Los prefijos más comunes y sus valores son los siguientes:

tera = 10^{12} *(billón)**
giga = 10^{9} *(mil millones)***
mega = 10^{6} *(millón)*
kilo = 10 (mil)*
centi = 10^{-2} *(centésima)*
mili = 10^{-3} *(milésima)*
micro = 10^{-6} *(millonésima)*
nano = 10^{-9} *(mil millonésima)****
pico = 10^{-12} *(billonésima)*****
** trillion USA*
*** billion USA*
**** billionth USA*
***** trillionth USA*

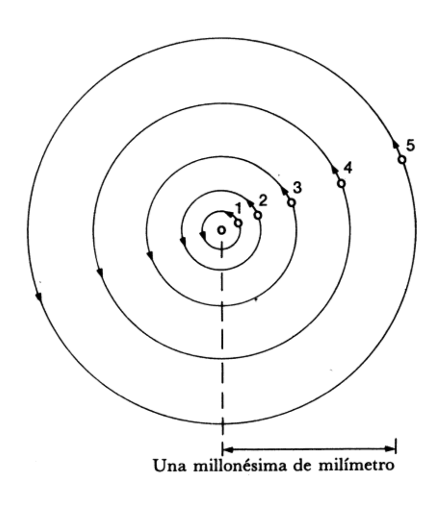
Al hablar de una onda electromagnética en particular, podemos definirla sirviéndonos de uno de los tres parámetros siguientes: su longitud de onda, su frecuencia, o la energía de cada uno de sus fotones. En realidad, los tres métodos no son sino distintas formas de utilizar la misma regla. La longitud de onda y la frecuencia son interdependientes: al aumentar la longitud decrece la frecuencia, y viceversa. La energía de los fotones aumenta al aumentar la frecuencia y disminuye al aumentar la longitud de onda. Por consiguiente, cuanto menor sea la longitud de onda mayores serán tanto la frecuencia como la energía. Si nos imaginamos las ondas en forma de vibración y que la energía aumenta al hacerlo el ritmo vibratorio, no nos sorprenderá excesivamente descubrir que las ondas electromagnéticas de menor longitud sean las ondas gamma, que se encuentran entre los productos de las reacciones nucleares.

Este es el punto de vista de la denominada física *clásica*. Las radiaciones electromagnéticas se desplazan en forma de ondas y para diferenciarlas entre sí se mide su longitud o su frecuencia. Ahora bien, la física clásica no es más que una primera aproximación a la realidad. Para comprender el funcionamiento interno de los láseres, debemos observar lo que ocurre en el interior del átomo, lo que significa adentrarse en el reino de mayor complejidad de la física atómica, la teoría de los cuantos y la mecánica cuántica.

CUANTOS, FOTONES Y TRANSICIONES

La teoría de los cuantos fue formulada a finales del siglo XIX por el físico alemán Max Planck. Según Planck, la energía no se distribuye de una forma regular sino en cantidades bien determinadas denominadas *cuantos*, al igual que la materia está constituida por partículas denominadas átomos. La radiación es energía y por consiguiente también lo es la luz. De esta forma, Planck demostró que la luz, además de propagarse por medio de ondas, lo hace también en forma de paquetes de energía llamados *fotones*. Pero un fotón no es una minúscula bola como había imaginado Newton, sino esencialmente una gota de pura energía electromagnética que, hablando con propiedad, carece de masa, puesto que se desplaza a la velocidad de la luz y la *teoría de la relatividad* determina

que cualquier partícula dotada de masa sería incapaz de desplazarse a tal velocidad.



3. El simple átomo de hidrógeno ilustra claramente el descubrimiento de Niels Bohr, según el cual los electrones de un átomo cualquiera se mueven en diferentes niveles de energía u órbitas. En el centro se encuentra el núcleo y la órbita más cercana al mismo es la que corresponde al nivel de energía más bajo, al que se asigna el número cuántico 1. Cuando el único electrón del átomo de hidrógeno se encuentra en dicha órbita se dice que tanto el átomo como el electrón están en el estado fundamental. Cuanto más se aleja el electrón del núcleo mayor es la energía de la órbita y el número cuántico y cuanto más alejada del centro, esté la órbita, mayor cantidad de energía requerirá el electrón para saltar a ella.

Olvidemos por el momento los fotones y veamos de qué modo la teoría de los cuantos es aplicable a los átomos.

La teoría de los *cuantos* proporcionó a los científicos una nueva imagen de la materia y la energía. Un átomo consiste en un *núcleo* rodeado de *electrones* que giran a su alrededor. A principios del presente siglo, Niels Bohr explicó que los electrones no se limitan a desplazarse a su antojo. (Por cierto, fue Niels Bohr quien escribió el borrador de la famosa carta de Albert Einstein dirigida a Franklin Roosevelt aconsejando el desarrollo de la bomba atómica.) Gracias a Bohr, ahora sabemos que los electrones de un átomo sólo son capaces de desplazarse en *órbitas* determinadas, situadas cada una de ellas a diferente distancia del núcleo. Los electrones pueden saltar de una a otra órbita, pero sólo ajustándose exactamente a una de las órbitas posibles. Cada órbita está asociada a una cierta energía fija y definida, y el *nivel de energía* de un átomo (es decir, la cantidad de energía que contiene) depende de las órbitas que ocupen sus electrones.

La mejor forma de comprender la teoría de los cuantos consiste en observar el ejemplo predilecto de los físicos: el simple átomo de hidrógeno en el cual un solo electrón gira alrededor de un núcleo consistente en un solo *protón*. En honor a la sencillez, en el diagrama N.° 3 se muestra un átomo de hidrógeno con cinco posibles órbitas. (En teoría hay muchas más, pero en la práctica sólo importan las más cercanas al núcleo.) Existe un *número cuántico* asignado a cada órbita que, junto con la energía del nivel, aumenta al hacerlo la distancia que la separa del núcleo. El número cuántico de la órbita más cercana al núcleo es 1, y cuando ésta se halla ocupada el átomo se encuentra en su nivel más bajo de energía. Al aumentar la distancia del núcleo lo hacen también los números cuánticos y la energía de los niveles. El único electrón del átomo de hidrógeno suele ocupar la órbita de menor energía, es decir, la más cercana al núcleo, y en tal situación se dice que tanto el electrón como el átomo se encuentran en *el estado fundamental*.

Para que pueda tener lugar un *salto cuántico* (o una *transición*) a una órbita superior, el electrón precisa energía. Un fotón contiene una cantidad particularmente conveniente de energía, pero no todos los fotones surten el efecto deseado. Debe tratarse de uno cuya cantidad de energía (cuanto) sea la correcta para que el electrón salte con precisión a otra órbita.

Si aparece un fotón que cumpla tal condición, el electrón lo absorbe y se desplaza a una órbita superior. Entonces se dice que tanto el electrón como el átomo se encuentran en un *estado excitado*. Sin embargo, el electrón no puede mantenerse excitado durante mucho tiempo, y por lo general en una pequeñísima fracción de segundo regresa al estado fundamentad. Al hacerlo se ve obligado a desprenderse de la energía sobrante, lo que logra emitiendo un fotón de igual energía y longitud de onda que el que acababa de absorber. A los procesos de cambio de órbita o nivel de energía se les denomina *transiciones*. Recordemos este término, así como su significado, puesto que aparecerá con frecuencia cuando se hable de diferentes tipos de láseres basados en distintas transiciones. Se utilizará también en algunas ocasiones para identificar un fotón cuando esté dotado exactamente de la energía requerida para (o producida por) una transición.

LA CLAVE: EMISIÓN ESTIMULADA (LA *E* Y LA *S* DE L.Á.S.E.R.)

¿Pero qué ocurre si un electrón se encuentra ya en una órbita superior, en un estado excitado? Los átomos tienden hacia su estado fundamental. Por consiguiente, los electrones decaen espontáneamente y emiten fotones. Este proceso recibe el nombre de *emisión espontánea.*

En este punto aparece Albert Einstein. Einstein se preguntó qué ocurriría si un electrón estuviese ya en un estado excitado cuando se encontrase con un fotón de energía adecuada. Sería lógico suponer que el electrón se desplazaría a otra órbita todavía superior: lógico pero erróneo. Einstein predijo que el electrón se desplazaría, por el contrario, a una órbita inferior y emitiría un fotón, como en la emisión espontánea, excepto que en este caso el fotón estimulador no sería absorbido, sino que continuaría su trayectoria. Nos encontraríamos entonces con *dos* fotones de idéntica energía o longitud de onda. Esto es a lo que Einstein denominó *emisión estimulada.*

Este concepto formulado por Einstein en 1916 constituyó el principio de la idea que con el tiempo condujo al láser. Hemos visto ya que la palabra láser está formada por las iniciales inglesas de *luz amplificada por emisión estimulada de radiación.* Sin duda han deducido que si lográsemos bombardear los átomos con el tipo apropiado de fotones y al mismo tiempo dispusiéramos de un número suficiente de electrones en estado excitado, conseguiríamos estimular la emisión de una mayor cantidad de fotones y comenzaríamos a producir luz láser, es decir, *un chorro de energía luminosa de una misma longitud de onda.* El concepto es similar a lo que ocurre en un reactor nuclear o en una bomba atómica, donde los neutrones se precipitan contra los núcleos de uranio logrando que se rompan y emitan un mayor número de neutrones, que a su vez rompen otros núcleos de uranio, produciendo una potente reacción en cadena. ¿Sería posible hacer lo mismo con la luz?

Pocos fueron los que lo creyeron en un principio. La emisión estimulada pronosticada por Einstein fue verificada de forma experimental en el laboratorio durante los años veinte, pero incluso entonces la emisión espontánea era claramente dominante y la emisión estimulada raras veces se producía. Esto era debido a que los átomos se mantienen excitados durante un período tan breve de tiempo —aproximadamente una millonésima de segundo— que resulta improbable que el fotón apropiado

llegue en el momento adecuado para producir emisión estimulada. Sin embargo, la posibilidad existe. En realidad, ahora sabemos que en la atmósfera de Marte se producen de manera natural emisiones estimuladas en las longitudes de onda del infrarrojo cuando el sol excita las moléculas del dióxido de carbono. Y en las nubes gaseosas situadas cerca de ciertas estrellas también se producen de manera natural emisiones estimuladas en la gama de las microondas. No obstante, estos descubrimientos no se realizaron hasta después de haber inventado el láser.

JUGANDO CON LA MADRE NATURALEZA: INVERSIÓN DE LA POBLACIÓN

En la tierra, la emisión estimulada es excepcional y no tiene lugar sin intervención humana, puesto que la naturaleza posee una fuerte tendencia a conservar el denominado *equilibrio termodinámico*, que significa simplemente que tanto los átomos como las moléculas procuran mantenerse en el estado de energía más bajo posible. A temperatura normal hay muchos más átomos en el estado fundamental que en cualquier estado excitado, y cuanto mayor es el nivel de energía, menor es el número de átomos que lo ocupan. Esto significa que es mucho más probable que un fotón cuya energía corresponda exactamente a la de una transición determinada se encuentre con un átomo en el nivel de baja energía de la transición (que absorbería el fotón), que en el de alta energía (que podría ser estimulado para emitir otro fotón). Mientras se mantenga una distribución de energía denominada *normal,* no puede existir un láser.

Los científicos se dieron cuenta de ello y comprendieron que la única forma de producir una fuerte emisión estimulada consistiría en invertir la situación, es decir, que hubiese un mayor número de átomos en estado excitado que en estado no excitado. Esta condición es conocida como *inversión de la población,* y representa una desviación radical respecto a la distribución normal. Su radicalidad es tal que Arthur Schawlow, uno de los inventores del láser, dijo que durante muchos años los físicos consideraron dicha perspectiva inimaginable. ¡No es de extrañar que con semejante creencia no descubriesen el láser con anterioridad!

Para crear una inversión de población es preciso *bombear* los átomos o las moléculas con energía, de forma que pasen a ocupar niveles de

energía superiores. En la mayoría de los casos, los átomos o las moléculas regresan con tal rapidez a su estado normal que el esfuerzo resulta inútil. Pero si se bombean ciertos átomos o moléculas de la forma precisa y con la cantidad justa de energía, se logra invertir la población. El primero en conseguirlo fue Charles H. Townes, a pesar de que no se sirvió de luz, sino de microondas. Townes había trabajado en el radar durante la Segunda Guerra Mundial, y las microondas habían despertado su interés. (El radar utiliza ondas de radio de alta frecuencia y microondas.) Excitando moléculas de amoníaco en estado gaseoso, Townes y sus colegas construyeron el primer máser, es decir, microondas amplificadas por emisión estimulada de radiación.

Las moléculas de amoníaco tienen dos niveles de energía separados por un cuanto de energía que corresponde a las ondas electromagnéticas cuya longitud es de 1,25 cm aproximadamente. Townes y sus colaboradores sabían que ambos niveles de energía estaban presentes en las moléculas normales de amoníaco, pero que en su mayoría se encontraban en el estado fundamental. No sabían cómo lograr que todos los átomos alcanzasen su nivel superior. Sin embargo, habían descubierto otra cosa: las moléculas de amoníaco se comportan de una forma extraña cuando se encuentran sometidas a un campo eléctrico. El campo atrae las moléculas que se encuentran en el estado fundamental y repele a las excitadas. Por consiguiente, Townes decidió servirse de un campo eléctrico para separar ambos tipos de moléculas. Eliminando las moléculas en estado fundamental, logró una inversión de población en las restantes moléculas (las excitadas).

Tras lograr la inversión de población, la naturaleza siguió su curso. Algunas moléculas excitadas regresaron espontáneamente a su estado fundamental emitiendo, en el proceso, fotones de una longitud de onda de 1,25 cm. Dichos fotones estimularon la emisión de nuevos fotones procedentes de otras moléculas de amoníaco excitadas, los cuales estimularon a su vez otras emisiones entre las restantes moléculas excitadas. El proceso siguió multiplicándose sin que se lo impidiese la absorción causada por las moléculas que se encontraban en el estado fundamental.

Una vez inventado el máser, los científicos emprendieron un juego más ambicioso, el del láser (que en aquella época se denominó «máser óptico»).

¿Lograrían descubrir átomos o moléculas que pudiesen ser bombeados a niveles de energía superiores, creando una inversión de población, y produciendo entonces ondas luminosas especiales por emisión estimulada?

Se propusieron diversos métodos de bombeo. Uno de ellos, denominado *bombeo óptico*, consistía simplemente en utilizar la propia luz para excitar los átomos y las moléculas. Actualmente, el bombeo óptico se utiliza habitualmente e incluso se ha llegado a emplear la luz solar para excitar los láseres, si bien se usan con mayor frecuencia los arcos voltaicos, lámparas estroboscópicas (flash) y otros láseres. También se han utilizado haces de electrones o de protones para excitar los láseres, al igual que ciertos fragmentos producidos en las reacciones nucleares. Y en el caso de algunos láseres la energía proviene de reacciones químicas.

Todos los métodos de bombeo citados, se han utilizado y han surtido efecto. Sin embargo, en los años cincuenta, la mayoría de los científicos, incluidos Townes y Schawlow, creyeron que el primer método con el que conseguirían los resultados deseados consistiría en atravesar un gas con una corriente eléctrica.

Pero se equivocaron.

BIENVENIDO RUBÍ JUEVES

Quizá sea lógico que una herramienta tan fascinante como el láser se construyese, en primer lugar, con una piedra tan romántica como el rubí. Para ser precisos, un rubí artificial, puesto que el natural posee demasiadas impurezas.

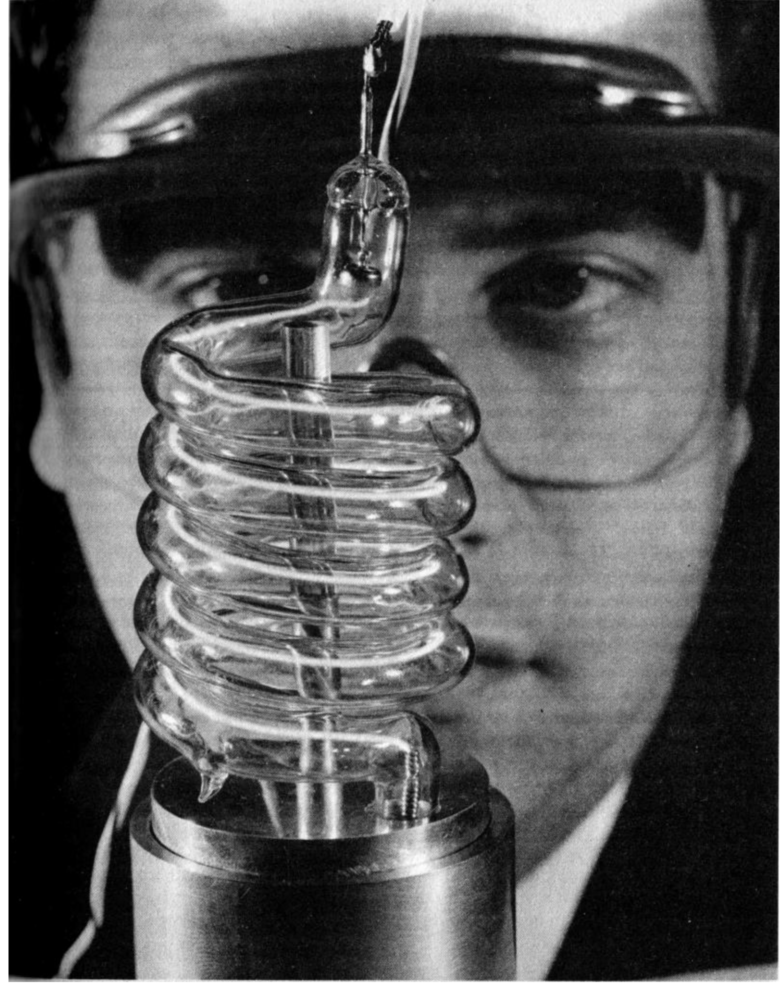
Ahora bien, la elección no obedeció a motivos sentimentales. Los átomos de cromo responsables de que el rubí sea rojo están dotados de una interesante —y útil— estructura de niveles de energía. Theodore Maiman estudió durante cierto tiempo el rubí como material para el máser y se convenció de su utilidad para el «máser óptico». Así pues, trabajando solo en los laboratorios de investigación Hughes en Malibu, California, comenzó sus investigaciones con una barra de rubí sintético de unos 4 cm. de longitud. Dichas barras de rubí están dotadas de una homogeneidad cromática casi parecida a la de la gelatinosa confitura de arándano recién extraída de la lata, aunque algo más clara, rosada y natu-

ralmente de mayor dureza. Maiman colocó entonces una lámpara espiral semejante a las utilizadas en la fotografía estroboscópica de alta velocidad a su alrededor (véase el diagrama N.° 4). Al poner la lámpara en funcionamiento, los átomos de cromo del rubí absorbieron luz verde y azul. De ese modo se excitaron la mayoría de los átomos de cromo creando una inversión de población. La primera meta había sido alcanzada.

A partir de entonces aumentó ligeramente la complejidad. La inversión de población en el láser de rubí incluye tres niveles de energía: el estado fundamental y dos estados excitados. La lámpara excita los átomos hasta el más elevado de los estados excitados. En dicho nivel, los átomos descienden rápidamente, o *decaen,* al nivel excitado inferior conocido técnicamente con el nombre de *estado metaestable* (que a pesar de que parezca tratarse de algún tipo de cáncer no lo es). En este estado, los átomos permanecen atrapados durante un *largo* período según la escala de valores atómicos, a pesar de que en realidad sólo se trata de una pequeña fracción de segundo. En su estado semiestable, los átomos de cromo se encuentran todavía excitados y son capaces de producir la anhelada emisión estimulada si sobre ellos inciden fotones de la longitud de onda adecuada.

¿De dónde proceden estos fotones? De la emisión espontánea. Al encontrarse en estado metaestable, algunos átomos de cromo decaen por sí solos al nivel fundamental. Como hemos aclarado con anterioridad, eso significa que dichos átomos emiten un fotón de una longitud de onda exactamente apropiada. Y cada vez que uno de dichos fotones entra en contacto con un átomo de cromo excitado en estado metaestable se emite otro fotón de idéntica longitud de onda. Entonces disponemos ya de dos fotones que entrarán en contacto con dos nuevos átomos, dando comienzo a una reacción en cadena.

Esto fue lo que ocurrió en el laboratorio de Maiman, en Malibu. Un brillante rayo láser de luz roja emergió de la barra de rubí. El destello duró sólo una 300 millonésima parte de segundo, mas, pese a ello, el primer láser acababa de nacer, Maiman dio a conocer los resultados de su experimento el jueves, día 7 de julio de 1960.

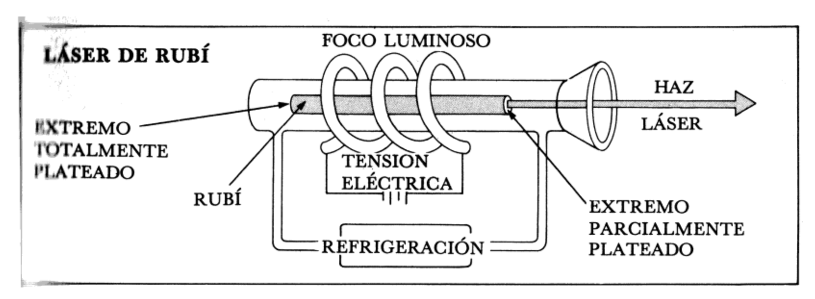


En esta fotografía tomada en 1960 vemos a Theodore H. Maiman estudiando el primer láser que construyó en los laboratorios de investigación de la empresa Hughes, en Malibu¡ California. El tubo espiral translúcido es una lámpara intermitente con la que se excitan los átomos del cristal de rubí sintético al que aquél rodea. Hughes Aircraft Company

EL SECRETO DEL RAYO: AMPLIFICACIÓN (LA *A* DE L.Á.S.E.R.)

Hemos recurrido a numerosas ideas, comenzando con las de Huygens y Newton, para llegar hasta el láser, y en realidad no hemos explicado plenamente el logro de Maiman. No hemos hablado de *amplificación*.

El láser produce un delgado e intenso haz de luz, sin que nada de lo que hemos explicado hasta estos momentos relacionado con la física de la emisión estimulada exija que la luz aparezca en forma de haz paralelo. En realidad, el producto de la emisión estimulada no tiene por qué ser un haz. Un fotón cuya energía sea apropiada puede estimular una emisión independientemente de su dirección. Sin otro elemento, una barra de rubí, después de ser sometida a bombeo óptico, se limitaría a producir un resplandor rojo sin proyectar haz alguno. En tal caso, el láser no sería más que una curiosidad de laboratorio. Era preciso encontrar alguna forma de amplificación.



4. El láser de rubí diseñado originalmente por Theodore Maiman parece sencillo; sin embargo, la mayoría de los físicos de su época creían que era más factible construir un láser haciendo pasar una corriente eléctrica a través de un gas, que excitando un cristal con un foco luminoso. Los «espejos» en el láser de Maiman consistían en una auténtica capa de plata sobre los extremos de una barra de rubí. Uno de los extremos estaba enteramente cubierto de plata, para reflejar la totalidad de la luz láser hacia el interior de la barrita; el extremo opuesto estaba sólo parcialmente plateado, de forma que reflejase hacia el interior parte de la luz y permitiese el paso de la luz restante en forma de haz láser. La refrigeración es necesaria debido a que sólo una pequeña parte de le energía luminosa procedente del foco se convierte en luz láser; el resto calienta el cristal y dicho calor debe ser eliminado para no dañar el material.

Por fortuna, Maiman no dejó a su barrita sola. Pulimentó sus extremos hasta lograr que la superficie fuese plana y suave, dándoles a conti-

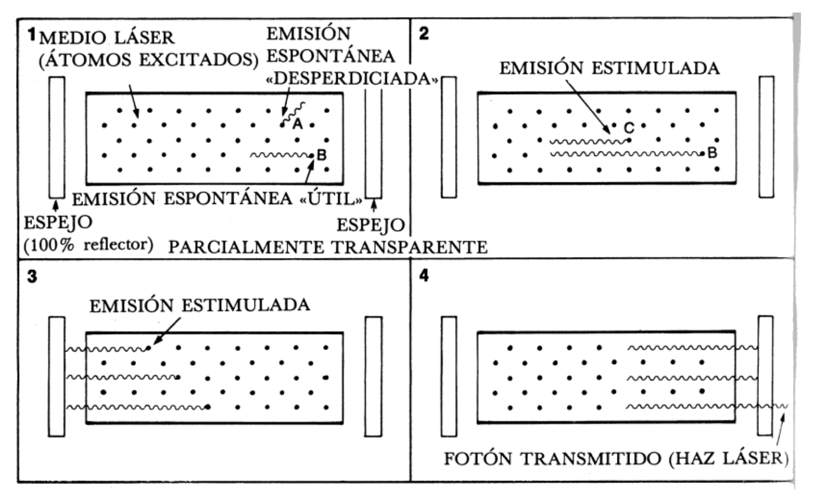
nuación un baño de plata con el fin de que reflejasen nuevamente hacia el interior de la barrita la luz láser roja. La diferencia fue enorme. La emisión estimulada que emergía de los costados de la barrita no volvía jamás a entrar en ella, mientras que la luz emitida en sentido longitudinal se reflejaba de nuevo hacia su interior. Cuanto mayor era la distancia que la luz recorría en el interior de la barrita, más se acrecentaba su intensidad. Un fotón se convertía en dos, dos en cuatro, y así sucesivamente. (En el rubí, el número de fotones de emisión estimulada aumenta aproximadamente en un cinco por ciento por cada centímetro que recorre la luz.)

Sin duda se trata de un proceso que no puede durar indefinidamente: es el tipo de reacción en cadena que produce la explosión en una bomba atómica. El número de átomos excitados impone una limitación en el proceso: sencillamente, llega un momento en que no queda ningún átomo de cromo en estado excitado. Sin embargo, hay algo más de lo que todavía no hemos hablado. Uno de los extremos plateados de la barrita de rubí permite que se filtre parte de la luz. Cada vez que la luz alcanza dicho extremo, una pequeña fracción —del orden del 10 por ciento— de los fotones es proyectada hacia el exterior, mientras que el resto es reflejado de nuevo hacia el interior de la barrita. Los fotones reflejados hacia el interior siguen incrementando la emisión estimulada y los proyectados hacia el exterior constituyen el haz láser. El proceso se muestra en forma esquemática en el diagrama N.° 5.

Detengámonos brevemente para observar de nuevo el camino recorrido, puesto que este proceso no equivale en realidad a nada de lo que ocurre en nuestra experiencia habitual. La intensidad de la luz aumenta en el interior del láser y una pequeña fracción escapa a través de uno de sus extremos plateados. A pesar de que digamos que la luz «rebota» de los extremos, sugiriendo en cierto modo que se trata de una sola onda que se desplaza repetidamente, en la mayoría de los láseres la luz se precipita de manera continua contra los extremos durante un período relativamente largo (en la escala de valores atómicos). El haz de luz, a su vez, escapa en todo momento y su intensidad en el exterior no es más que una pequeña fracción de la del interior.

Técnicamente, este proceso de reflexión de la luz de un extremo al otro recibe el nombre de *oscilación* y el lugar donde se produce se denomina *resonador* o cavidad láser. Townes y Schawlow elaboraron la idea básica de un resonador dos años antes de que Maiman construyese el

primer láser; su sistema consistía en colocar reflectores o espejos paralelos en los extremos de una delgada barra del material que se desease estimular. A Gordon Gould se le ocurrió también la misma idea, mas eso forma parte de una amplia polémica de la que se hablará en el capítulo cuarto.



5. He aquí una visión simplificada de lo que ocurre en el interior de una cavidad láser: (1) Los átomos del medio láser son excitados o bombeados por una fuente de energía externa (por ejemplo una lámpara intermitente o una descarga eléctrica). La emisión espontánea se produce naturalmente. Los fotones emitidos en direcciones que no correspondan con la de los espejos, como el fotón A, abandonan el medio láser y no contribuyen a la formación del haz. Los fotones cuya dirección corresponda con la de los espejos, como el B, son útiles para el láser. (2) Cada uno de dichos fotones puede provocar la emisión estimulada de otro fotón idéntico en otro átomo excitado, como el C, y ambos se desplazan en la misma dirección. (3) Estos fotones estimulan la emisión en otros átomos excitados y la luz estimulada se refleja de un espejo al otro. (4) Cuando llegan al espejo parcialmente transparente algunos fotones escapan de la cavidad láser y forman el haz. Otros se reflejan y siguen estimulando a los demás y provocando nuevas emisiones.

Aquel primer láser de rubí constituye un buen ejemplo del funcionamiento de los láseres. En el capítulo próximo hablaremos de otros tipos de láseres, tales como los que usan diversos cristales o vidrios, gases, semiconductores y otros materiales. Sin embargo, antes de ocupamos de

otros modelos, observemos con mayor detenimiento las características comunes a todos ellos.

SUPERLUZ

Hemos empezado por establecer los principios físicos fundamentales del láser porque de ellos se desprenden, lógicamente, sus cualidades. Por ejemplo, el hecho de que los láseres emitan un estrecho haz de luz es una consecuencia del resonador de doble espejo utilizado en la mayoría de ellos; los fotones deben desplazarse de un extremo a otro en líneas esencialmente paralelas, y los que no lo hacen escapan por los costados sin llegar a formar parte del haz.

Su estrechez fue lo que permitió que se proyectase un rayo láser sobre la luna y permaneciese todavía lo suficientemente enfocado para reflejar la señal. El grado de paralelismo es impresionante. El haz de un típico láser barato (cuyo coste oscile entre los 100 y los 500 dólares) sólo alcanza una divergencia (o abertura) de una veinteava fracción de grado aproximadamente. Eso significa que, después de desplazarse un kilómetro, el diámetro del rayo será tan sólo de un metro, es decir, que su divergencia habrá sido sólo del uno por mil.

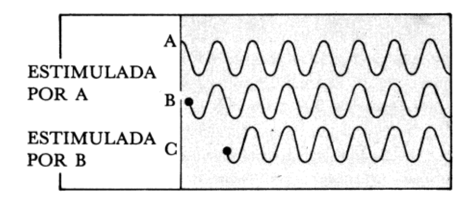
Un haz láser puede ser enfocado sobre un punto mucho más reducido a corta distancia. Debido a que los rayos de luz láser son paralelos, una simple lente basta para enfocar toda su energía sobre un punto de un diámetro aproximado de una milésima de milímetro. Esta cualidad convierte al láser en un instrumento ideal para delicadas aplicaciones quirúrgicas y para tallar o taladrar ciertos materiales.

Los láseres producen, a su vez, luz en un rango muy limitado de frecuencias, es decir, prácticamente de un solo color. Se suele decir que su luz es por completo monocromática, de una longitud de onda fija y única en un momento dado. Pero esto no es del todo cierto. En la práctica, numerosos efectos de carácter complejo pero relativamente débiles intervienen ensanchando el rayo de luz emitida sobre una pequeña gama de longitudes de onda, que varía según la óptica y el material láser que se utilicen. No obstante, el láser es capaz de emitir una gama de longitudes de onda más estrecha que cualquier otra fuente luminosa.

Algunos láseres pueden ser utilizados para emitir luz multicolor. Hasta aquí hemos hablado de los láseres que oscilan únicamente en una sola transición. Sin embargo, es posible que un láser oscile en dos o más transiciones simultáneamente, produciendo, por consiguiente, luz de dos o más longitudes de onda diferentes. En muchos espectáculos se utilizan láseres de este tipo con el fin de emitir varios colores de manera simultánea.

¿QUÉ SE ENTIENDE POR COHERENCIA?

Otra de las propiedades de la luz láser es la denominada *coherencia*, factible gracias al proceso de emisión estimulada. Cuando un fotón estimula la emisión de otro, el nuevo fotón comienza su vida en la misma *fase* que el fotón que lo ha estimulado, es decir, que sus ondas están exactamente acopladas, alcanzando ambas sus puntos máximos y mínimos al mismo tiempo (véase el diagrama N.° 6). En otras palabras, son coherentes y mantienen su coherencia a lo largo de muchas longitudes de onda, puesto que tienen la misma frecuencia.



6. La luz láser es coherente por ser el resultado de una emisión estimulada. Cuando un fotón estimula a otro la nueva luz comienza exactamente en la misma fase que el fotón que la ha estimulado.

Una vez más debemos aclarar nuestra afirmación. Al igual que en cualquier fenómeno físico real, la práctica difiere ligeramente de la teoría. La distancia a lo largo de la cual el láser mantiene su coherencia —su *longitud de coherencia*— está limitada a varios kilómetros. Por otra parte, la luz más coherente de fuentes que no sean láseres, como las lámparas espectrales especiales que emiten luz casi monocromática, posee una longitud de coherencia no superior a algunos centímetros, y la longitud de coherencia de una bombilla normal es tan reducida que se considera despreciable.

No es posible exagerar la importancia de la coherencia. Esta representa un elevado nivel de orden que es excepcional en el mundo de la física

macroscópica (es decir, observable por el hombre), donde, en general, se supone que las partículas están dotadas de movimientos aleatorios. Es precisamente la coherencia, por ejemplo, lo que posibilita la holografía que se describe en el capítulo 12.

RAYOS CONTINUOS, PULSACIONES Y ULTRAPULSACIONES

Algunos láseres producen rayos continuos mientras que otros emiten breves pulsaciones, y ambos tienen su utilidad. Para tratar enfermedades de la piel es necesario que el rayo sea continuo y estable; sin embargo, para taladrar el metal o intentar que se produzca una fusión termonuclear se precisan breves y potentes pulsaciones.

Ciertos láseres son capaces de emitir, de manera ininterrumpida un rayo durante varias horas, días o incluso años. Otros, como el primero fabricado por Maiman, producen breves pulsaciones cuya duración es de unas millonésimas o mil millonésimas de segundo. Existen también algunos cuyas pulsaciones son ultracortas, con una duración no superior a una billonésima de segundo.

La clave de las pulsaciones ultracortas consiste en mantener los fotones producidos por emisión estimulada en estricta fase mientras se desplazan de un extremo al otro. Esto significa que todos los fotones producidos por emisión estimulada provienen necesariamente de un solo fotón emitido de modo espontáneo. Cada vez que el grupo de fotones alcanza el extremo parcialmente transparente, escapan algunos de ellos produciendo una pulsación ultrabreve. En un láser característico de unos treinta y tres centímetros de longitud, la duración del viaje de ida y vuelta (es decir, el intervalo entre las pulsaciones ultrabreves) es de unas mil millonésimas de segundo. Las propias pulsaciones son en realidad mucho más breves y se miden en *picosegundos* (billonésimas de segundo). Hasta el momento de escribir estas líneas, la pulsación más breve que se ha conseguido ha sido de 0,09 picosegundos, y sus autores han sido los físicos Richard L. Fork, B.I. Green y Charles V. Shank desde su laboratorio de Bell Telephone en Holmdel, Nueva Jersey. La longitud de cada una de dichas pulsaciones es sólo de 0,03 mm y consta apenas de ocho ondas luminosas.

Los físicos pueden utilizar estas pulsaciones de picosegundos para investigar ciertos procesos químicos, tales como la misteriosa *fotosíntesis*, que utilizan las plantas para elaborar hidratos de carbono sirviéndose de la luz solar. Se hablará de dichos experimentos en el capítulo 14.

POR QUÉ LOS RAYOS LÁSER NO SE PARECEN A SUS REPRESENTACIONES GRÁFICAS

Las fotografías de láseres en acción muestran casi invariablemente resplandecientes haces de luz proyectados en el espacio; sin embargo, cuando uno se encuentra con un auténtico láser es muy posible que ni siquiera llegue a percibir el rayo que de él emana. Una razón obvia para ello consiste en que muchos láseres emiten una luz de ciertos intervalos del espectro, tales como el infrarrojo o el ultravioleta, que son invisibles para el ojo humano.

Pero aun en el caso de que se trate de luz visible, no podrá percibirse el rayo a no ser que existan suficientes partículas en el aire para dispersar (o mejor difundir) aquél hasta alcanzar el ojo del observador. El problema radica en que la luz se desplaza en línea recta a lo largo del eje del rayo, y en el caso de que alguien se encuentre junto a él sólo percibirá la luz si existe algo que la refleje. Ese algo puede consistir en humo, que es el truco utilizado por los fotógrafos para que los haces de luz láser sean visibles. Podría también tratarse de partículas de polvo cuya presencia en el aire es prácticamente inevitable y que en general dispersan (o mejor difunden) suficiente luz para que se perciba una tenue línea luminosa en el caso de un láser de moderada intensidad (aunque no la suficiente para ver el haz rojo que emiten los pequeños láseres de helio-neón). También podría tratarse de un pedazo de papel o de cualquier otro objeto sólido que se interpusiese en la trayectoria del haz, pero en tal caso lo único que se lograría ver sería un punto luminoso en el lugar donde se haya interrumpido el haz, sin llegar a percibir la luz desde el láser hasta el punto iluminado.

Hay quienes aseguran haber visto un resplandor procedente de algunos láseres. Están en lo cierto, pero lo que han observado no era el propio haz láser. Volviendo a los principios fundamentales, recordemos que la luz láser procede de la emisión estimulada de átomos de cromo o de

algún otro material. Sin embargo, sólo las ondas luminosas emitidas a lo largo del eje del láser pasan a formar parte de la oscilación (es decir, reflejarse de un extremo al otro) que produce el haz láser. El resto de la luz estimulada escapa del propio láser sin ser objeto de mayor amplificación. Si, por ejemplo, desmontamos la caja metálica de un láser común de helio-neón, comprobaremos que del interior del tubo emana un resplandor rojo producido por la luz desperdiciada que emiten los átomos excitados en cualquier dirección que no corresponda exactamente con la del eje del tubo.

Por cierto, dicha luz no se limita a dispersarse. ¡Ojalá lo hiciese! Al contener la mayor parte de la energía utilizada para excitar el láser se convierte en calor que debe ser eliminado, con el fin de evitar que eventualmente destruya el láser. En los láseres de baja potencia, el aire circundante puede por sí solo cumplir la función deseada, pero los de alta potencia requieren algún sistema de refrigeración que utilice agua u otros refrigerantes en circulación.

El problema del calor sobrante constituye una de las manifestaciones más evidentes de una de las principales limitaciones de los láseres; su capacidad productora de luz es de escaso rendimiento (o eficacia). En un láser común, sólo entre el uno y el dos por ciento de la energía utilizada pasa a formar parte del rayo. No obstante, existe una gran gama de modelos cuya eficacia (o rendimiento) queda entre el uno y el 30 por ciento. La escasa eficacia (o rendimiento) es un problema también común a otras fuentes luminosas. Sólo el dos por ciento aproximadamente de la energía eléctrica consumida por una bombilla común se convierte en luz visible, e incluso las lámparas fluorescentes convierten apenas un 10 por ciento de la electricidad en luz visible.

¿HASTA QUÉ PUNTO SON PELIGROSOS LOS LÁSERES?

Jamás debe mirarse directamente en la dirección de donde proviene un haz láser. Las lentes del ojo pueden focalizar el rayo en un punto sobre la parte más sensible a la luz del cuerpo humano, la retina, situada en la parte posterior del glóbulo ocular. La intensidad, si bien no la potencia total, incluso de un rayo láser de baja potencia es comparable a la del sol, y su observación directa, al igual que la del astro, puede causar

una ceguera parcial permanente. Sin embargo, una exposición momentánea ante un rayo de baja potencia, en especial si es móvil, al igual que una accidental ojeada al sol, no presenta realmente problema alguno, puesto que el ojo está dotado de un sistema de aversión automático.

Los láseres con los que tal vez uno llegue a encontrarse no son capaces de agujerear el cuerpo ni la ropa. En realidad, el calor del haz de un láser de helio-neón de baja potencia ni siquiera llega a percibirse en el interior de la muñeca. Los láseres capaces de ocasionar quemaduras se encuentran exclusivamente en ciertas instalaciones militares, laboratorios de láser, quirófanos y fábricas, que los utilizan para cortar o taladrar ciertos materiales (tales como las plantas aeroespaciales, donde se usan láseres para cortar planchas de titanio destinadas a aeronaves militares). Dichos lugares están claramente señalizados, y todos los láseres capaces de dañar la vista o cualquier otro órgano de menor sensibilidad, aunque sólo sea en teoría, están sujetos (en Estados Unidos) a rigurosas normas dictadas por un departamento de la Administración de alimentos y medicamentos denominado Oficina Federal de Salud Radiológica.

En realidad, mucha gente vinculada con la industria del láser se queja de que las normas de seguridad son excesivamente rigurosas. El caso es típico de la mayoría de las industrias controladas, pero con buenas razones. Exceptuando algunos experimentos peligrosos durante los primeros años de investigación en el campo del láser, y más recientemente algunos grupos musicales que lo han utilizado en sus espectáculos, el historial del láser desde el punto de vista de seguridad es en verdad ejemplar. Según un informe del Gobierno de Estados Unidos sólo ha tenido lugar veinte accidentes relacionados con rayos láser, y algunos de ellos no llegaron a causar daños permanentes. Las únicas muertes asociadas con los láseres han sido las de gente electrocutada por el suministro de alto voltaje que se utiliza para producir descargas eléctricas en los láseres de gas.

Hasta ahora hemos hablado de cualidades comunes a todos los láseres. A continuación trataremos de los numerosos tipos de láseres existentes.

3. UN SURTIDO DE LASERES: DIFERENTES TIPOS

¿Qué materiales pueden utilizarse para los láseres? Al parecer casi todos. Theodore Maiman dijo bromeando que cuando los científicos se enteraron de que había convertido una barra de rubí en el primer láser, casi todos los que disponían de algún cristal en su laboratorio intentaron colocarle superficies reflectantes en los extremos para comprobar si lograban convertirlo en un láser. Lo asombroso es que muchos lo consiguieron.

Cristales, sólidos, líquidos, gases y una infinita variedad de materiales se utilizan hoy como medios activos en los láseres. La acción del láser ha sido observada literalmente en miles de transiciones. Cada transición produce una longitud de onda diferente, y dichas longitudes cubren una amplia gama que se extiende desde las microondas hasta los rayos X.

Las mayores ondas, con una longitud de varios centímetros, se encuentran en la región de las microondas y son producidas por los máseres. A pesar de que los máseres fueron descubiertos en primer lugar, en la actualidad se los clasifica en una subcategoría de la familia láser. Como su nombre indica, los máseres operan exclusivamente en la región de las microondas del espectro luminoso. La longitud de onda más corta en la que se ha logrado amplificar la luz es de 1,4 nanómetros, es decir 1,4 millonésimas de milímetro en el extremo de longitud de onda larga de la región de los rayos X del espectro electromagnético.

La hazaña la llevó a cabo un equipo en el Lawrence Livermore National Laboratory, según un informe publicado en *Aviation Week and Space Technology* que no ha sido confirmado hasta estos momentos por ninguna publicación científica ni por Livermore, donde la reacción oficial ha sido «sin comentario» debido a sus posibles aplicaciones bélicas.

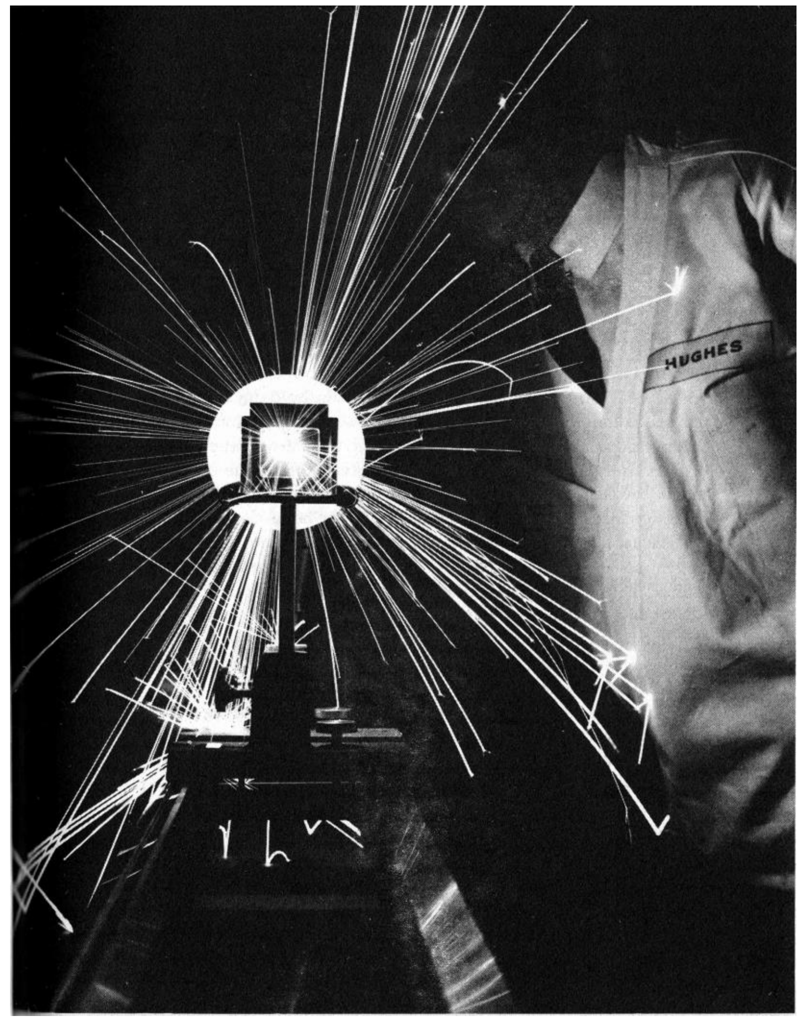
Si nos fijamos en lo que se ha dicho en el último párrafo nos daremos cuenta de que la familia de los láseres cubre una extensísima gama de longitudes de onda (las microondas tienen una longitud de onda un millón [10^6] de veces superior a la de los rayos X amplificados). La luz visible representa una pequeña parte de la gama sobre la que se extiende el láser, así como un diminuto fragmento de la totalidad del espectro electromagnético, y por consiguiente no es difícil comprender que la

mayoría de los láseres emitan haces de luz invisible para el ojo humano. Comenzando por las ondas de mayor longitud, los láseres emiten microondas, ondas milimétricas, ondas submilimétricas, luz infrarroja, luz visible, luz ultravioleta y, al parecer, rayos X. Todos los láseres tienen muchas cosas en común, pero existen también entre ellos algunas diferencias considerables. En la región submilimétrica, por ejemplo, un tejido metálico puede cumplir la función de «espejo», mientras que evidentemente no ocurriría otro tanto en la región de luz visible.

Al describir los diferentes tipos de láseres procuraremos no utilizar un excesivo número de cifras. Sin embargo, existe una medida de suma importancia: la de la longitud de onda. La longitud de onda de un láser define el tipo de radiación que emite, así como el modelo de láser en cuestión. Recordemos que longitud de onda, frecuencia y energía de los fotones son términos intercambiables que pueden referirse a una misma onda luminosa. Recordemos también que cada tipo de láser emite luz en una longitud de onda única.

Además de diferenciarse en cuanto a la longitud de onda, los láseres lo hacen también con relación a la potencia y a las condiciones operacionales. Algunos láseres son sumamente débiles, capaces de producir como máximo una millonésima de vatio durante sólo una millonésima de segundo. Por otra parte existen sistemas gigantescos capaces de generar más de un millón de vatios durante varios segundos en cada momento dado. Algunos láseres sólo funcionan cuando se los enfría hasta alcanzar temperaturas extremadamente bajas, del orden de los 200 grados centígrados bajo cero. Otros precisan temperaturas lo bastante elevadas para volatilizar metales, puesto que su longitud de onda se genera en una transición del vapor metálico.

Para introducir cierto orden en este caos, clasificaremos los láseres según el tipo de material con el que producen la luz. Las cuatro primeras categorías —láseres de cristal (y vidrio), gas, semiconductores y líquido— no presentan dificultad alguna; sin embargo, las dos restantes —láseres de electrones libres y rayos X— son los miembros más complejos de la familia de los láseres.



Un láser de rubí perfora una plancha de duro tantalio metálico. Cuando aparecieron los primeros láseres, a los investigadores les gustaba experimentar con su nuevo «juguete» para comprobar cuántas hojas de afeitar lograban penetrar con una pulsación. Hughes Aircraft Company

LÁSERES DE CRISTAL Y VIDRIO

Theodore Maiman construyó el primer láser de la historia con un cristal de rubí sintético, y los *láseres de rubí* se usan todavía comúnmente hoy constituyendo los ejemplares más característicos de láseres de cristal.

El rubí sintético, al igual que el natural, está constituido por óxido de aluminio y un pequeño porcentaje de cromo en calidad de impureza. Dicha impureza, o sea, el cromo, es lo que hace que el cristal sea rojo o rosado y constituye el medio activo del láser. El papel del óxido de aluminio es meramente el de cristal «anfitrión», el recipiente en el que se albergan los átomos de cromo.

El color rojo del rubí proviene de la fluorescencia producida por los átomos de cromo después de haber absorbido luz. Para ser precisos, el cromo absorbe selectivamente ondas luminosas de 550 nanómetros, es decir, $5,5\times10^{-7}$ m. Como hemos visto con anterioridad, el cromo desciende entonces al estado de energía metaestable, produciendo a su vez luz roja visible de 694 nanómetros al decaer al estado fundamental. (Cuanto mayor sea la longitud de onda, menor será su energía luminosa, de ahí que la longitud aumente al descender el cromo a niveles de energía inferiores.)

Un láser de rubí puede ser construido con unas dimensiones y una potencia suficientes para taladrar finas planchas metálicas. A los primeros investigadores les atrajo la idea de agujerear hojas de afeitar, de ahí que comenzaron a medir la potencia del láser en «gillettes». Un láser de 3 gillettes, por ejemplo, sería capaz de taladrar simultáneamente tres hojas de afeitar. Este sistema de medidas un tanto humorístico ha dado paso en la actualidad a un procedimiento más técnico. En realidad, la hoja de afeitar tradicional ha sido también desplazada por instrumentos de mayor sofisticación. Una vez más, el romanticismo y el humor han sido postergados por la tecnología moderna.

El láser de rubí fue el primero que se utilizó para tareas prácticas, tales como taladrar cuñas de diamante donde se insertan a continuación ciertos tipos de cable. Al contrario de lo ocurrido con otros modelos primitivos de láseres, el láser de rubí se utiliza todavía comúnmente hoy, a pesar de contar con limitadas aplicaciones debido a su reducida potencia y a los dilatados intervalos entre pulsaciones necesarios para la refrigeración del cristal.

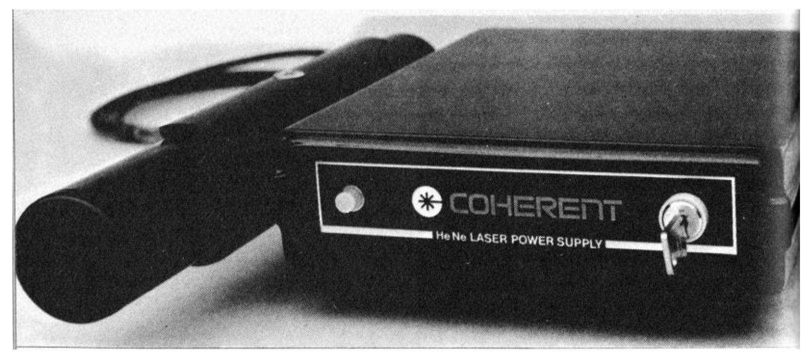
El láser de cristal de mayor uso en la actualidad es el denominado YAG, que consiste también en un material sintético de la familia del granate. El YAG está compuesto primordialmente por los elementos itrio, aluminio y oxígeno, a los que se añade una pequeña cantidad de neodimio. El nombre de YAG corresponde a las iniciales inglesas de itrio, aluminio y granate. Al igual que el rubí actúa como anfitrión con relación a los átomos de cromo, el YAG lo hace respecto a los de neodimio, los cuales emiten un potente haz láser a 1,06 micrómetros ($1{,}06 \times 10^{-6}$ m) en la gama de longitudes de onda del infrarrojo, ligeramente superiores a las de la luz visible. Al igual que el rubí, el YAG es bombeado mediante la luz de un flash o de otra fuente luminosa de parecida intensidad. Este cristal es un buen conductor del calor, y por consiguiente puede emitir un rayo continuo además de pulsaciones. Los láseres de YAG se utilizan entre otras cosas para taladrar metal o como localizadores de blancos en el campo bélico.

El neodimio puede también añadirse al vidrio para construir un *láser* de *vidrio de neodimio.* El YAG es sustituido por vidrio debido a que su fabricación es más fácil y más barata. Sobre todo cuando la cantidad de material que se requiere para el láser es voluminosa. Su luz es casi idéntica en longitud de onda a la del láser de YAG, y sus pequeñas variaciones son debidas a la interacción de los átomos de neodimio con los del material anfitrión, pero son inferiores al uno por ciento. El mayor problema consiste en que el vidrio no es tan buen conductor del calor como el YAG y, por consiguiente, no resulta práctico en los casos en que el láser deba emitir rápidas pulsaciones o un haz continuo.

En los laboratorios se han verificado muchísimos modelos de láseres cristalinos, pero sólo algunos han llegado a producirse comercialmente. Entre ellos, los más importantes se sirven de otros materiales cristalinos como anfitriones para el neodimio y otros elementos químicamente parecidos. Sin embargo, hasta estos momentos ninguno de ellos ha alcanzado la importancia de los láseres de rubí, YAG de neodimio o vidrio de neodimio. Al igual que los de rubí y de neodimio, todos estos láseres son bombeados por la luz de un flash o de otra fuente luminosa intensa (en algunos casos se llega a utilizar otro láser).

LÁSERES DE GAS

Tres de los primeros pioneros del láser en Estados Unidos, Charles Townes, Arthur Schawlow y Gordon Gould, concentraron originalmente sus esfuerzos en la construcción de láseres de gas. Maiman se les anticipó con el láser de rubí, pero su instinto no les traicionó. Hoy se conocen más de 5.000 transiciones láser en gases, de las cuales unas 1 300 tienen lugar en átomos y el resto en moléculas. (Algunas de dichas transiciones ocurren en gases ionizados denominados *plasmas*, que para algunos físicos constituyen otro estado de la materia, pero que tratándose de una sutil distinción no merece que nos ocupemos de ella.)



El láser de helio-neón es uno de los más comunes y se encuentra en los laboratorios de prácticamente todas las escuelas de EE.UU. El componente en forma de maletín de este modelo es la fuente de alimentación y el haz de luz es emitido por el cilindro independiente de la izquierda. La llave de la derecha obedece a las normas de seguridad vigentes en aquel país. Coherent Inc

El más popular de todos los láseres lo constituye una variedad de los láseres de gas: el omnipresente láser de helio-neón que se encuentra en los laboratorios de física de la mayoría de las escuelas, en los controles automáticos de salida en los supermercados —donde descifra esas curiosas etiquetas codificadas que aparecen sobre diversos productos— y en el ramo de la construcción, donde se utiliza para alinear paredes y edificios. A pesar de que las ventas de láseres cristalinos son sólo ligeramente inferiores a las de los láseres de gas (105 millones de dólares contra 125 millones en 1980, según los cálculos de la revista *Láser Focus),* existe

una variedad mucho más extensa de láseres de gas de uso común. Además, debido a que los láseres de gas son, en general, más baratos han tenido mayor aceptación que los cristalinos.

Los láseres de gas constituyen una categoría tan amplia que, con diversos criterios se subdivide en varios grupos. Nuestra clasificación se basará en el método un tanto arbitrario, pero sencillo, consistente en la forma de excitar sus átomos o moléculas. Es decir, los procedimientos utilizados para su bombeo.

El más común de los métodos utilizados para bombear o excitar un láser de gas consiste en hacer que una corriente eléctrica atraviese el gas en cuestión (por lo general, una mezcla de dos o más gases) contenido en el interior de un tubo. En teoría, la idea es sencilla. Se coloca un electrodo en cada extremo del tubo y se les suministra un voltaje lo suficientemente elevado para que la corriente fluya del uno al otro. En general se requieren unos dos mil voltios para dicha operación, de ahí que sea importante acercarse a los circuitos de alimentación de los láseres con suma precaución. Lo que se consigue es la llamada *descarga eléctrica,* y consiste en un flujo de electrones que atraviesan el gas, de un electrodo al otro. En este proceso, los electrones transfieren parte de su energía a los átomos circundantes, y después de una serie de malabarismos interatómicos de energía se produce una inversión de población.

El ejemplo más común de descarga eléctrica lo constituye el familiar *láser de helio-neón*, capaz de emitir luz ininterrumpidamente durante muchos miles de horas. Su potencia resulta baja, alcanzando apenas unas milésimas de vatio, pero es capaz de concentrar la luz que produce en un haz cuyo diámetro aproximado es de 1 mm. En el láser de helio-neón, la descarga excita los átomos de helio, los cuales transfieren su energía a los de neón y éstos emiten entonces luz roja. Algo parecido ocurre en las lámparas rojas de neón o en las fluorescentes, pero evidentemente sin que produzcan haces de luz láser.

Existen varios modelos de láseres similares en los que se excita el gas helio, el cual a su vez transfiere la energía de excitación a otros átomos, por lo general de algún metal volatilizado que emite entonces un haz láser. Un buen ejemplo lo constituye el *láser de helio-cadmio* que emite un rayo azul. El cadmio es un metal blando de color blanco azulado que se convierte en gas al elevar su temperatura a varios centenares de grados centígrados. Entre estos láseres se encuentran algunos capaces de emitir

en dos o más longitudes de onda, según su óptica interna. Los primeros láseres de helio-neón, por ejemplo, producían en realidad luz invisible en la gama infrarroja, y sólo más adelante se perfeccionaron los láseres rojos de 633 nanómetros que se usan en la actualidad.

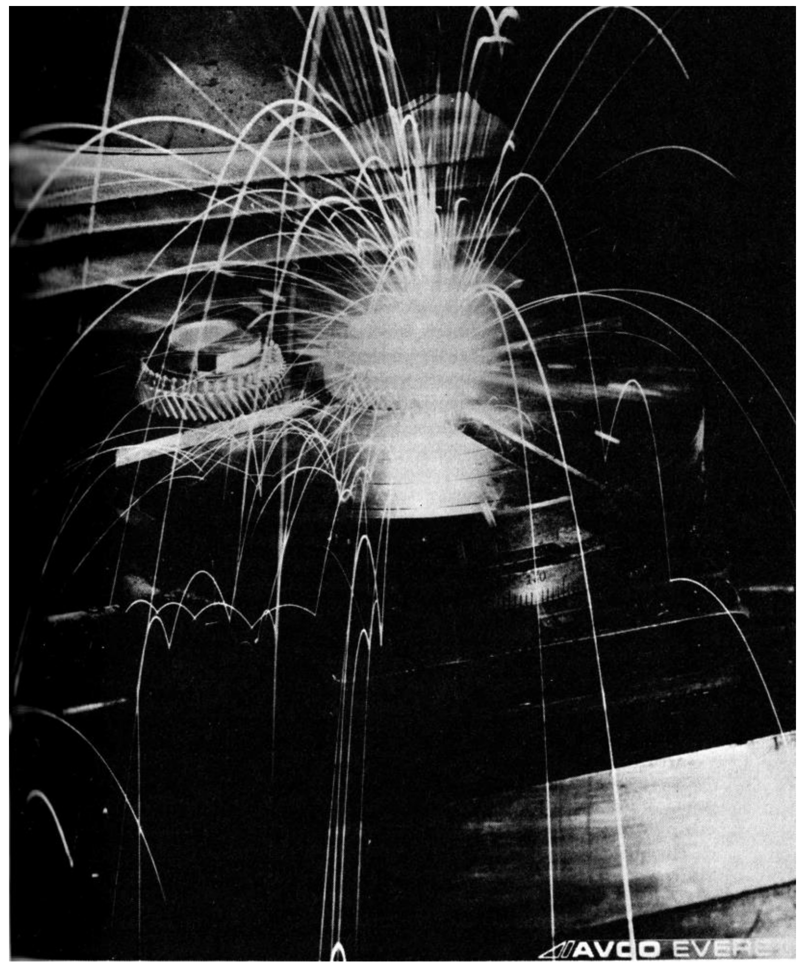
Además del helio, otros miembros del grupo químico normalmente no reactivo de los bases «inertes» o «raros», pueden también ser excitados mediante la electricidad. El mejor ejemplo lo constituyen el argón y el criptón, ambos capaces de emitir en una extensa gama de longitudes de onda, visibles en su mayoría. También es posible mezclar ambos gases con el fin de obtener luz láser en la mayoría de las longitudes de onda que emiten cada uno de ellos. Los *láseres de argón* son de mayor potencia, y se utilizan generalmente en la industria y en la investigación. Los *láseres de criptón,* así como los de ambos gases, emiten una gama más interesante de colores y suelen emplearse sobre todo en los espectáculos luminosos.

Todos los láseres de gas mencionados hasta ahora producen haces continuos, pero su potencia es limitada. No resulta práctico construir láseres de helio-neón de una potencia superior a los 0,05 vatios, o láseres de argón de más de 100 vatios.

Existe, sin embargo, otro modelo accionado también por descargas eléctricas cuya potencia es muy superior: se trata del espectacular *láser de dióxido de carbono* cuya luz se centra en una banda de longitudes de onda alrededor de los 10 micrómetros, o 0,01 mm. La longitud de onda de la luz infrarroja invisible emitida por este láser es unas veinte veces más larga que las longitudes de onda visibles de los láseres de helio-neón, argón y criptón. Los láseres de dióxido de carbono son capaces de emitir continuamente potencias que oscilan entre fracciones de vatio y centenares de kilovatios. Estos últimos, cuya información se mantiene secreta, serían de aplicación bélica, y es de suponer que sólo pueden emitir unos breves segundos en un momento dado. También es posible construir láseres de dióxido de carbono de potencias todavía superiores cuyos períodos de emisión sean extremadamente breves.

El láser de dióxido de carbono se ha convertido en el verdadero comodín de los láseres industriales de alta potencia, debido en parte a su gran eficiencia del orden del 30 por ciento comparada con el 1 por ciento del láser cristalino de neodimio. Su elevado rendimiento, combinado con la relativa facilidad con la que se elimina el calor superfluo de los gases,

significa que se evitan los problemas de refrigeración que limitan los usos de los láseres de gas o de cristal.



El láser de dióxido de carbono es el que se utiliza en los procesos industriales más penosos. En esta fotografía, su haz suelda el eje de transmisión de una caja de cambios de automóvil. Las líneas curvas son producidas por las chispas que desprende; su haz infrarrojo es invisible. Avco Everett Research Laboratory Inc

Existe una diferencia sutil pero significativa entre el mecanismo interno del láser de dióxido de carbono y el de los demás láseres ya enunciados. La energía utilizada para excitar el dióxido de carbono no hace que se eleven los electrones a una órbita superior, sino que provoca vibraciones de los átomos, que componen las moléculas. Por esta razón se dice que el láser en cuestión opera en una transición vibracional (es decir, una transición entre dos niveles de energía vibracional), en lugar de hacerlo en una transición *electrónica* (como ocurre cuando se desplaza un electrón entre dos órbitas). Este hecho tiene una importancia práctica, debido a que, en general, las transiciones electrónicas producen más energía que las vibracionales. Por consiguiente, los láseres que se sirven de transiciones electrónicas producen longitudes de onda en o alrededor de la gama visible, mientras que los de transiciones vibracionales producen ondas de mayor longitud, en la gama infrarroja, por lo general de unos 2 o 3 micrómetros.

Otro láser de alta potencia excitado por descarga es el de *monóxido de carbono*, que opera en una transición vibracional de unos 5 micrómetros (5×10^{-3} mm) en la gama infrarroja. Probablemente se le encontrarían muchísimas aplicaciones a este láser si el de dióxido de carbono no fuese tan perfecto. Adolece, además, de algunos problemas. Su luz de 5 micrómetros es absorbida por el aire en una proporción mucho mayor que la del láser de dióxido de carbono, suele tratarse de una máquina bastante voluminosa, y generalmente debe ser refrigerada hasta alcanzar temperaturas extremadamente bajas.

Una variante de la excitación por descarga eléctrica consiste en canalizar un haz de electrones hacia el interior del gas láser. Esta técnica se utiliza cuando es importante transferir una elevada cantidad de energía al gas en un período breve de tiempo, como, por ejemplo, en los láseres pulsados de dióxido de carbono de alta potencia.

El haz de electrones representa básicamente un nuevo paso en el campo de la potencia con relación a las descargas eléctricas. En éstas, los electrones se desplazan desde una placa con carga negativa a otra positiva, que atrae los electrones con carga negativa. Podemos observar el mismo fenómeno durante las tormentas en forma de rayos. Los haces de electrones comienzan también en forma de descarga, si bien, por lo general, la energía de los electrones es superior a la de las descargas ordinarias. Luego, los haces atraviesan una serie de campos electromagnéticos,

que no sólo aceleran los electrones incrementando su energía, sino que además los focalizan dirigiéndolos a un punto preciso. En el caso de los láseres, esto significa que se puede descargar una cantidad muy superior de energía en un gas y con un control mucho más preciso sobre el lugar donde se coloca que sirviéndose de una descarga eléctrica. También permite descargar la energía sobre el gas con mucha mayor rapidez. Todas estas consideraciones pueden tener gran importancia.

Por otra parte, su coste puede llegar a ser muy alto. Los generadores de haces de electrones son muy voluminosos y su precio resulta elevadísimo. Forman parte integrante de los generadores de partículas coronados por sistemas tan imponentes como el acelerador lineal de la universidad de Stanford, cuya extensión es de 3 kilómetros. Los que se utilizan para activar láseres son mucho menores, pero sin dejar de ser engorrosos y caros. Tanto el tamaño como la apariencia general externa de uno de los modelos comerciales de generadores de rayos de electrones son muy semejantes a los de los camiones que se utilizan para la recogida de basura; sin embargo, no cabe la menor duda de que su mecanismo interno es mucho más sofisticado. Como punto de referencia digamos que se pueden obtener los dos mil voltios necesarios para excitar un láser de helioneón con una fuente de alimentación cuyo tamaño sería inferior al de este libro.

LÁSERES «EXCIMER»

Hemos decidido dedicar un capítulo a los láseres excimer, a pesar de que pertenecen todavía a la categoría de los láseres de gas, debido a su particular interés y a su importancia. En cierto sentido, también sirven de enlace entre los láseres de gas, excitados eléctricamente, de los que hemos hablado, y otros importantes tipos de láseres de gas excitados por reacciones químicas.

En los láseres excimer, los electrones de alta energía, procedentes de un haz o de una descarga depositan energía en el gas del láser. En este sentido no se diferencian de los láseres eléctricos ordinarios. Sin embargo, el efecto de dicha energía es muy diferente. Hace que el gas raro (argón, criptón o xenón) reaccione con un halógeno (cloro, flúor, bromo o yodo) para formar un excimer, es decir, una molécula capaz de existir

sólo en un estado electrónico excitado. Cuando un excimer emite un fotón, ya sea por emisión espontánea o estimulada, se desintegra en sus átomos constituyentes, en lugar de descender a su estado fundamental (no existente). Dicha desintegración asegura automáticamente que la población del nivel inferior de la transición láser no deje de ser cero, simplificando los requisitos para obtener una inversión de población. Si conseguimos producir moléculas de excimer, habremos logrado automáticamente invertir la población. ¡Muy astuto!

Los láseres excimer constituyen un descubrimiento de los años setenta que sólo han comenzado a difundirse en el campo comercial en fecha reciente y cuyo uso es casi exclusivo entre los investigadores. Sin embargo, sus características son atractivas para numerosas aplicaciones, en particular debido a la alta potencia con que pueden emitir en la gama ultravioleta, donde escasean los láseres de gran potencia. Los láseres ultravioleta son de gran utilidad en la fotoquímica, para desintegrar moléculas y grabar las obleas de silicio usadas en los componentes electrónicos.

LÁSERES QUÍMICOS

Los láseres de gas también pueden ser excitados, por así decirlo, con la sola ayuda de reacciones químicas. La más importante de dichas reacciones tiene lugar en el *láser de fluoruro de hidrógeno,* en el que se combina un átomo de hidrógeno con uno de flúor, produciendo fluoruro de hidrógeno. Al combinarse, ambos átomos se genera energía, y el producto inicial consiste en una molécula de fluoruro de hidrógeno en estado vibracional excitado. Normalmente, la energía en cuestión se disiparía en forma de calor, pero si se colocan las moléculas excitadas en una cavidad láser y se llevan a cabo todos los ajustes necesarios, se logra extraer dicha energía en la forma de un haz láser.

En la práctica, el hidrógeno y el flúor son introducidos en el láser, donde se encienden con el fin de que produzcan una llama, la cual a su vez provoca la formación de fluoruro de hidrógeno en estado excitado. A continuación, el gas que contiene fluoruro de hidrógeno excitado atraviesa una cavidad láser que presenta una superficie reflectante en cada extremo. En dicha cavidad se obtiene un haz láser con una longitud de onda

de unos tres micrómetros (3×10^{-3} mm) que se encuentra en la gama infrarroja. Gracias al paso ininterrumpido del fluoruro de hidrógeno a través de la cavidad, la acción del láser es continua. También resulta posible construir láseres de fluoruro de hidrógeno que emitan pulsaciones. Sin embargo, el diseño de grandes láseres químicos presenta un problema aerodinámico para lograr que el gas fluya adecuadamente y dichos láseres suelen tener el aspecto de túneles de ventilación.

El atractivo primordial del láser de fluoruro de hidrógeno consiste en su capacidad para emitir a alta potencia. También es cierto que, en general, se puede almacenar más energía en una cantidad determinada de material por procedimientos químicos que por medio de la electricidad. Y además no es preciso disponer de ningún voluminoso alimentador de alta potencia como el enorme generador de haces electrónicos mencionado anteriormente. Lo único que se precisa es algún recipiente para los productos químicos y algo para encenderlos. En la práctica, ni el hidrógeno ni el flúor se acostumbran a utilizar en estado puro, puesto que son difíciles de manejar, empleando en su lugar mezclas de las que emanan dichos elementos en el interior del láser. También es posible seleccionar productos que se inflamen al entrar en contacto el uno con el otro. Estos láseres son los más atractivos desde el punto de vista de los programas bélicos, de los que hablaremos más adelante, y los investigadores militares estudian minuciosamente sus múltiples detalles.

Los investigadores militares trabajan asimismo en el diseño de láseres de fluoruro de hidrógeno en los que se sustituye el hidrógeno por *deuterio*. El deuterio —algunas veces denominado *hidrógeno pesado*— es sencillamente un isótopo del hidrógeno con una masa doble de la normal. El núcleo del deuterio contiene un protón y un neutrón, mientras que el núcleo del hidrógeno ordinario contiene un solo protón. Se utiliza para fabricar bombas de hidrógeno y en las investigaciones sobre la fusión. A pesar de que el deuterio es mucho más caro que el hidrógeno ordinario, los *láseres de fluoruro de deuterio* emiten en una longitud de onda ligeramente superior (4 micrómetros) que les permite penetrar la atmósfera con mayor facilidad, lo que representa una ventaja considerable cuando se trata de disparar a través del aire.

LÁSERES DE GAS BOMBEADOS ÓPTICAMENTE

El sistema de bombeo óptico, al que hemos aludido anteriormente en relación con los láseres de cristal, se utiliza también en algunos láseres de gas. La idea es sencilla, clara y aplicable a todos los tipos de láseres. Lo único que se necesita es un láser u otra fuente luminosa que emita luz de la longitud de onda necesaria para excitar el material láser. Por desgracia, el sistema de bombeo óptico es inevitablemente de baja eficacia, debido al escaso rendimiento de las fuentes luminosas en general. En la práctica, el sistema eléctrico de excitación suele ser más eficaz para los láseres de gas. (No es posible excitar los láseres de cristal o de vidrio por medio de la electricidad, puesto que los electrones no pueden penetrar un cuerpo sólido.)

En general, el sistema de bombeo óptico en los láseres de gas se utiliza sólo cuando no existe otro medio para producir una determinada longitud de onda. Esta es una situación que se da con cierta frecuencia en los laboratorios de investigación, e incluso existen algunos láseres de este tipo fabricados comercialmente; sin embargo, la mayoría de ellos han sido construidos en los propios laboratorios. Casi sin excepción acostumbran a ser de baja potencia.

Los investigadores esperan construir algún día láseres bombeados ópticamente de alta potencia sirviéndose de una fuente luminosa cuya eficacia no ofrece problema alguno: el sol. Estos láseres se utilizarían en el espacio como fuente de energía o instrumento de propulsión (véase el capítulo 14); ahora bien, a pesar de que el concepto ha sido demostrado en los laboratorios, faltan todavía muchos años para que se convierta en una realidad práctica.

LÁSERES DE GAS BOMBEADOS NUCLEARMENTE

La utilización de fragmentos atómicos procedentes de las reacciones de fusión nuclear para excitar láseres de gas despertó en su día grandes esperanzas, pero los resultados conseguidos hasta estos momentos son sumamente modestos. La idea consiste en introducir combustible nuclear en la cavidad láser, ya sea recubriendo las paredes con él o insuflándolo en forma de gas. Con la ayuda de neutrones se desintegrarían los núcleos de los átomos del combustible nuclear, produciendo fragmentos con

energías muy elevadas; éstos excitarían entonces el material de la cavidad y se originaría a su vez un haz láser.

La Administración Espacial y Aeronáutica Nacional (NASA) comenzó a investigar este concepto, así como el de los láseres bombeados por el sol, con la esperanza de descubrir un sistema que les permitiese transmitir energía de un satélite a otro. Para poner en práctica la idea original de la NASA era preciso disponer de un reactor nuclear que contuviese combustible nuclear gaseoso, como, por ejemplo, hexafluoruro de uranio, en lugar de uranio en estado sólido. El núcleo del reactor sería incorporado en la cavidad láser y gran parte de la energía que generaría se convertiría directamente en un haz láser, sin producir calor ni electricidad como ocurre en los reactores convencionales. El ejército también ha mostrado interés en este tipo de láseres debido a la alta potencia que se les pronostica.

Las primeras demostraciones con láseres de bombeo nuclear tuvieron lugar en 1974, pero desde entonces el progreso ha sido lento. Para los experimentos se precisan reactores especiales que produzcan intensas emisiones de neutrones cuya duración sea una pequeña fracción de segundo. Los mejores resultados obtenidos hasta hoy con un láser de bombeo nuclear se deben a Rusell De Young y a sus colegas de la Universidad de Miami, en Ohio, que en 1980 lograron emitir tan sólo unos mil vatios. A partir de entonces, la NASA decidió no proseguir con el programa en cuestión, debido a la carencia de los medios económicos necesarios para construir un reactor especial capaz de alcanzar potencias superiores. El ejército parece no mostrar prácticamente interés alguno.

LÁSERES DE SEMICONDUCTORES

Hasta aquí, hemos hablado de láseres con escasos parientes cercanos en nuestra vida cotidiana, a excepción de las lámparas fluorescentes y de neón, que se parecen vagamente a ciertos láseres de gas en cuanto a que en ambos casos fluye por su interior una corriente eléctrica que excita los átomos de helio y que al retornar a su nivel inferior de energía emiten luz. Sin embargo, el láser de semiconductor (o diodo) cuenta con un pariente mucho más cercano que indudablemente hemos visto todos: se trata del *diodo emisor de luz* denominado LED. Las cifras rojas de mu-

chas calculadoras de bolsillo y relojes digitales se deben a formaciones de pequeñísimos LED, cada uno de los cuales representa un punto en la pantalla. (Las cifras plateadas de otros tipos de calculadoras y relojes corresponden a un sistema totalmente diferente, que es el de cristal líquido.)

Para comprender lo que ocurre en los láseres de semiconductores y en los LED es necesario que adquiramos antes algunos conocimientos sobre los semiconductores. Los materiales semiconductores, tales como el silicio, deben su nombre a que conducen electricidad mejor que los aislantes pero no tan bien como los conductores. Controlando cuidadosamente la composición del material semiconductor es posible determinar asimismo la forma en que conducirá la electricidad, permitiendo de ese modo la construcción de numerosas estructuras de gran utilidad, como los complejos circuitos electrónicos integrados.

La operación de los LED es similar a la de los láseres de semiconductores y sus estructuras eléctricas son también semejantes. En ambos casos, una corriente eléctrica excita partículas del material semiconductor portadoras de cargas positivas y negativas, que más adelante, al combinarse, se neutralizan mutuamente. Durante el proceso de combinación, que consiste ante todo en una transición desde un nivel de energía electrónica elevado a otro inferior, se producen fotones. En el caso de los LED predomina la emisión espontánea, que es en realidad lo que vemos cuando utilizamos la calculadora. Sin embargo, a los láseres de semiconductores se les cortan las superficies extremas con el fin de que reflejen la luz como si fuesen espejos y se les suministra una corriente más elevada. De esta forma se logra que predomine la emisión estimulada.

Al igual que otros aparatos que utilicen semiconductores, este tipo de láseres, son de reducidas dimensiones, y pueden fabricarse en grandes cantidades a precios relativamente bajos. Pueden llegar a ser tan pequeños como un grano de sal o incluso menores. A pesar de que los láseres de semiconductores son bastante eficaces comparados con otros láseres, la disipación del calor constituye un problema debido a su reducido tamaño, y su potencia es baja. Otra desventaja de su pequeñez es la exagerada divergencia de su rayo —de 10 a 20 grados como mínimo, es decir, cien veces superior a la de los láseres más baratos de helio y neón—, debida a la limitada longitud del resonador (recuerda la falta de precisión de un revólver de cañón corto comparada con la de un rifle). No obstante,

en muchos casos, un objetivo adecuado puede solucionar el problema. Los láseres de semiconductores desempeñan un papel esencial en las comunicaciones por fibra óptica (véase el capítulo 6).

La tecnología de los láseres de semiconductores ha sido probablemente el área tecnológica de los láseres donde mayor progreso se ha realizado en los últimos años. El primer láser comercial de semiconductor capaz de emitir un haz continuo a temperatura ambiente apareció en el mercado en 1975. En la actualidad, los investigadores de Bell Telephone Laboratories proyectan una duración de un millón de horas (unos 100 años) a temperatura ambiente para los láseres de semiconductores de emisión continua fabricados en su laboratorio. Algunos investigadores de Varian Associates, en Palo Alto, California, han llegado incluso a proyectar duraciones «geológicas» (millones de años) para ciertos tipos de LED que han desarrollado. Otros descubrimientos incluyen el desarrollo de nuevas estructuras capaces de producir rayos de mejor calidad.

Los investigadores han descubierto, además, la posibilidad de utilizar una nueva gama de materiales. Durante muchos años, los láseres de semiconductores se fabricaron con compuestos de galio, arsénico y aluminio que emiten luz en una longitud de onda que oscila entre los 800 y los 900 manómetros —es decir, 8×10^{-4} y 9×10^{-4} mm— en la gama infrarroja. Sin embargo, trabajos recientes incluyen la construcción de una nueva familia de láseres que utilizan indio, galio, arsénico y fósforo, cuyas emisiones luminosas tienen lugar en una longitud de onda que oscila entre 1,1 y 1,6 micrómetros (11×10^{-4} mm), también en la gama infrarroja. Estos láseres son particularmente atractivos en el campo de las comunicaciones por fibra óptica. Otros investigadores trabajan en la construcción de láseres de semiconductores que emitan rayos de luz visible (roja).

El láser de semiconductor es idóneo para numerosas aplicaciones de baja potencia, en cuyo campo puede que acabe sustituyendo al láser de helio-neón. Lo que falta es que se coordinen sus ventajas, o sea, que se combine su larga duración con un rayo de alta calidad en un láser que se fabrique con facilidad, en grandes cantidades y a bajo precio. Parece ser que se trata de una simple cuestión de tiempo, por lo menos en cuanto a los láseres infrarrojos se refiere, pero existen todavía problemas que impiden el paso a menores longitudes de onda visibles.

LÁSERES LÍQUIDOS

Si es posible que la acción del láser tenga lugar en los gases y en los sólidos, ¿por qué no en los líquidos? Los líquidos pueden constituir, efectivamente, el medio activo en los láseres, y existe un importante y extenso grupo de láseres basados en colorantes orgánicos. Los colorantes, que en realidad son sólidos a temperatura ambiente, son disueltos en un líquido (por lo general de tipo orgánico, como el alcohol) para formar una disolución.

Lo que tiene de especial el láser de colorante es la naturaleza de sus transiciones. En casi todos los demás láseres, la transición se efectúa entre dos estados de niveles fijos de energía, lo que significa que la emisión se produce en una banda de longitudes de onda fija, muy estrecha y claramente definida. Incluso en los láseres de dióxido de carbono y otros tipos cuyos niveles de energía mantienen una separación mínima, se originan transiciones discretas en longitudes de onda determinadas. Sin embargo, la separación entre los niveles de energía de los colorantes orgánicos es tan extremadamente reducida que en la práctica puede considerarse inexistente. La existencia de numerosos niveles energéticos se debe a la complejidad de las moléculas de colorante y permiten que, por medio de transiciones electrónicas, se produzca una amplia gama de longitudes de onda, visibles en su mayoría.

Es posible construir un sistema óptico que seleccione una sola longitud de onda entre la gama producida por un láser. Además, dichos sistemas ópticos son ajustables de forma que sintonicen continuamente la longitud de onda de salida, entre todas las longitudes posibles para un colorante determinado. La mayoría de los colorantes son sintonizables a lo sumo a través de un diez por ciento de la gama visible, pero se puede organizar una secuencia de tintes de forma que la longitud de onda de salida sea sintonizable a lo largo de la totalidad del espectro visible.

Lo que hace que valga la pena pagar el elevado precio de un láser de colorante que oscila entre los cinco y los cincuenta mil dólares es el hecho de poderlo sintonizar con toda precisión, por lo general haciendo girar simplemente un botón, de manera que emita una gama de longitudes de onda inferior a la de cualquier otra fuente y de mucha mayor intensidad. Por esta razón, los láseres de colorante pueden desempeñar un

papel inestimable en ciertos experimentos relacionados con la química o la física atómica.

Cabe mencionar que uno de los láseres más extraños que se han construido es precisamente de colorante. Se trata de un instrumento que no emite haz alguno, sino una aureola. Z.G. Horvath, del Instituto central de investigación física de Budapest, Hungría, y dos colegas del Instituto de física de Lebedev, en Moscú, han construido un láser circular que emite luz a lo largo de sus 360 grados. La circunferencia del aparato en cuestión está cubierta por una película parcialmente reflectante que lo convierte en una cavidad láser circular. En el centro de ese extraordinario láser se encuentra un colorante bombeado por otro láser. Horvath está convencido de que es posible ampliar su técnica con el fin de construir un láser esférico que emita luz por todos los puntos de su superficie. Sin embargo, es dudoso que tanto el láser circular como el esférico encuentren aplicación alguna más allá de su laboratorio.

EL LÁSER DE ELECTRONES LIBRES

Un reciente ejemplar para la galería de los láseres es el denominado láser de electrones libres. La denominación electrones libres obedece al hecho de que el medio activo que emite la luz consiste en un haz de electrones, liberados de los átomos, que atraviesa un campo magnético.

Este tipo de láser precisa un gran acelerador de electrones o un anillo de almacenamiento de donde emerja el haz de electrones. Además debe disponer de un juego de grandes y potentes imanes, para modificar la dirección del haz. El primer láser de este tipo fue puesto en funcionamiento en el Stanford Linear Accelerator Center en 1977 por un físico de la universidad de Stanford llamado M.J. Madey. Para hacernos una idea, digamos que la construcción del acelerador de Stanford costó varios centenares de millones de dólares y que, en sí, sólo constituye una parte del láser en cuestión. Sabemos, sin embargo, que es posible servirse de un acelerador de menor tamaño, aunque hasta estos, momentos no está claro cuales serían sus dimensiones mínimas.

Lo que ha despertado mayor interés con relación a los láseres de electrones libres es que se haya previsto que podrán sintonizarse en una amplia gama de longitudes de onda, quizá desde la región de las microondas

hasta la de los rayos X, a pesar de que no existe ningún aparato capaz de operar a lo largo de tan amplia gama.

Al ejército le interesa este láser por una razón evidente: su alta potencia. Originalmente se creía que el haz de electrones constituiría una poderosa arma, pero resultaría difícil focalizar un haz de electrones con carga negativa, que se repelerían mutuamente, a larga distancia. La transformación de este haz de alta energía pero de difícil manejo en un haz láser solucionaría muchos problemas. El haz láser puede ser focalizado sobre un blanco lejano con mayor facilidad. En el momento de escribir este libro daban comienzo una serie de experimentos destinados a poner a prueba los láseres de electrones libres, bajo el patrocinio de la Defense Advanced Research Projects Agency.

ADELANTE CON EL LÁSER DE RAYOS X (QUIZÁ)

No hay mejor método para enterarse de la rapidez con que se progresa en un campo determinado que el de escribir un libro sobre el tema en cuestión. Estábamos acabando de escribir este capítulo cuando al parecer salió a la luz un nuevo artefacto: el láser de rayos X.

Decimos *al parecer* porque no está todavía claro lo que ha ocurrido exactamente. Según un artículo publicado en *Aviation Week and Space Technology* se había puesto en funcionamiento un láser de rayos X emitiendo en una longitud de onda de 1,4 nanómetros ($1{,}4 \times 10^{-6}$ mm), y no cabe duda de que algún experimento había tenido lugar en el Lawrence Livermore National Laboratory de California. Sin embargo, todavía no se sabe con certeza lo que ocurrió. La reacción oficial de la dirección del Livermore ha sido «sin comentario», y abunda el escepticismo entre los demás investigadores con relación a los detalles publicados por la revista conocida en la comunidad aeroespacial con el nombre de «El soplo de la aviación». (El secreto se debe a potenciales implicaciones bélicas, de las que se hablará en el capítulo 7.)

Los investigadores que trabajan en el campo de los láseres suelen ser muy cautelosos ante informes relacionados con láseres de rayos X, puesto que existen ya varios precedentes. En 1972, un físico de la universidad de Utah causó una gran sensación cuando dio a conocer el hecho de que había construido un láser de rayos X. Pero no era cierto. Los efectos que

creía debidos a los rayos X obedecían en realidad a otra causa, y los esfuerzos que realizó para dar a conocer su «descubrimiento» (divulgado por *Newsweek* entre otras publicaciones) sin llevar a cabo minuciosas comprobaciones le sumieron en el desprestigio en la comunidad de físicos.

Existe también otra razón sobre la que se apoya el escepticismo reinante. Incluso en teoría, la construcción de un láser de rayos X es sumamente difícil. Por ejemplo, el solo hecho de producir una inversión de población en una transición de 0,1 nanómetros requiere dos vatios por átomo. Los átomos excitados en tal transición descienden al estado fundamental en 10^{-15} segundos. El propio proceso de bombeo en un láser de rayos X lo volatilizaría. Además, ni siquiera sería factible construir un resonador adecuado, puesto que no existen espejos que reflejen los rayos X, y por consiguiente sería imposible disponer de un oscilador.

¿Para qué esforzarse en conseguirlo? Porque representa una meta difícil de alcanzar para los físicos. Además, evidentemente, existen posibles aplicaciones para los láseres de rayos X, algunas de ellas en el campo bélico, según nos recuerdan los físicos con regularidad cuando solicitan fondos para financiar sus investigaciones. Ahora bien, el interés de la mayoría de quienes trabajan en dicho campo parece radicar primordialmente en la dificultad intelectual que supone llevar a cabo una tarea de tan compleja envergadura.

Acaso el término «dificultad» sea excesivamente modesto. Se cree que fue necesaria una pequeña explosión nuclear para bombear el láser de rayos X de Livermore. Gran parte de la energía de dicha explosión se habría manifestado en forma de rayos X, que habrían servido para excitar los átomos, provocando una inversión de la población. La totalidad del proceso habría tenido lugar en un período brevísimo de tiempo, tal vez en un picosegundo (10^{-12} segundos, es decir, la billonésima parte de un segundo) a lo sumo, según ciertos investigadores de rayos X ajenos al Livermore. *Aviation Week* dijo que, durante la ultracorta pulsación, el láser produjo una elevadísima potencia del orden de centenares de billones de vatios. No obstante, debido a la brevedad de la pulsación, es probable que su energía total fuese tan sólo de unos centenares de julios (un julio es la cantidad de energía suministrada por un vatio durante un segundo), es decir, la suficiente para mantener una bombilla doméstica encendida durante unos segundos.

El hecho de que el láser de rayos X llegue a convertirse en una proposición práctica dependerá de lo que se entienda por «práctica». El que se necesite una bomba nuclear (por pequeña que ésta sea) para excitarlo presenta, sin duda, graves problemas. Los ingenieros del ejército tienen ciertas ideas que, si bien hoy parecen de ciencia ficción, acaso resulte prematuro enjuiciarlas.

¿HACIA DÓNDE NOS DIRIGIMOS AHORA?

¿Qué nuevos materiales se mostrarán útiles para el láser? Ésta fue la pregunta que le formulamos recientemente a Arthur Schawlow. Se limitó a mover la cabeza y decirnos que no podía responder, a que los científicos habían demostrado ya que se podía utilizar una gama tan extensa de materiales que era imposible prever cuál sería el próximo paso. Se limitó a decir que los científicos deberían buscar nuevos materiales y nuevas transiciones que les permitiesen construir mejores láseres en la región visible del espectro luminoso. Según él, los actuales láseres de haz visibles son de escaso rendimiento, opinión que comparten tanto los miembros del Pentágono como los del Departamento de energía, por razones totalmente diferentes.

Si se materializan las ideas de Schawlow y las de muchos otros científicos, podremos observar los próximos descubrimientos en la tecnología de los láseres con nuestros propios ojos.

4. LA BREVE, PERO TEMPESTUOSA, HISTORIA DEL LÁSER

La historia del láser cuenta con todos los elementos propios de una novela policíaca: patentes cuyo valor potencial es de centenares de millones de dólares; un grupo de eminentes rivales que se disputan el honor (y en algunos casos los beneficios) de haber inventado el láser; una contienda entre dos científicos que dura desde hace cuatro décadas; un descomunal pleito que perdura en la actualidad, y la carrera de un hombre arruinada por los secretos de Estado y la «caza de rojos» de Joseph McCarthy.

Añadamos a estos ingredientes un premio Nobel de física y una asombrosa revelación sobre el planeta Marte, y dispondremos de un improbable argumento para una sensacional película. Y sin embargo se trata de la historia auténtica de la invención y el desarrollo del láser, así como de los principios en los que se basa.

Su historia es básicamente la de siete hombres. Tres de ellos —el norteamericano Charles H. Townes y los rusos Nikolai G. Basov y Aleksander M. Prokhorov— compartieron el premio Nobel en 1964 por los descubrimientos que efectuaron en aquella época y que eventualmente condujeron a la invención del láser. El cuarto, Arthur L. Schawlow, colaboró con Townes para obtener la primera patente norteamericana que cubre los principios fundamentales del láser, y más tarde compartió el premio Nobel de física de 1981 por su utilización de láseres para el estudio de la naturaleza de los átomos y las moléculas. Theodore H. Maiman fue otro de los científicos que trabajando por su propia cuenta construyó el primer láser en 1960. El sexto fue Gordon Gould, cuya labor en el misterioso desarrollo del láser es difícil resumir en pocas palabras. Su papel ha sido sumamente complejo y ha agregado a la historia gran parte de su emoción y controversia, así como cierto elemento agridulce. Más adelante examinaremos detenidamente su contribución.

Estos científicos realizaron la mayor parte de sus investigaciones preliminares durante los años cincuenta. Sin embargo, para que la historia del láser sea justa, debemos retroceder sesenta años, con el fin de ocuparnos de un séptimo individuo, sin duda de todos conocido.

EL MAESTRO COLOCÓ LA PRIMERA PIEDRA

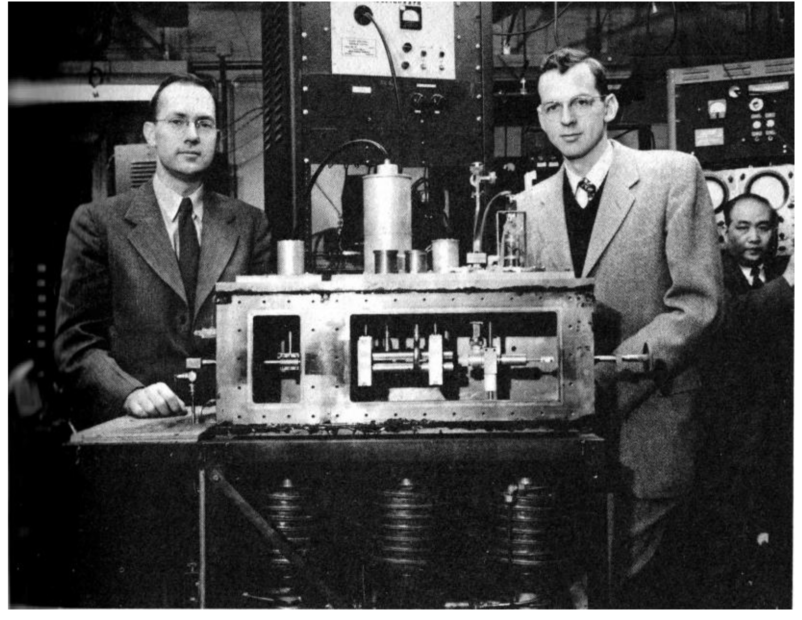
La historia comenzó en 1916, cuando Albert Einstein estudiaba el comportamiento de los electrones en el interior del átomo. Por regla general, los electrones son capaces de absorber o emitir luz. En realidad, los electrones emiten luz espontáneamente sin ninguna intervención externa. Sin embargo, Einstein previo la posibilidad de *estimular* los electrones para que emitiesen luz de una longitud de onda determinada. El estímulo se lo proporcionaría una luz adicional de la misma longitud de onda. A pesar de que R. Ladenberg verificó el pronóstico de Einstein en 1928, nadie pensó seriamente en construir un dispositivo basado en el fenómeno en cuestión hasta principios de los años cincuenta.

Recordemos que láser significa amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación. Einstein descubrió la *emisión estimulada,* pero para fabricar un láser se precisa también *amplificación* de dicha emisión estimulada.

La primera propuesta conocida para la amplificación de la emisión estimulada apareció en una solicitud de patente soviética en el año 1951, presentada por V.A. Fabrikant y dos de sus alumnos. Sin embargo, dicha patente no se publicó hasta 1959, y por consiguiente no afectó a los demás investigadores. Fabrikant sigue siendo un misterio en la actualidad, uno de los olvidados en la ruta de investigación del láser. En 1953, Joseph Weber, de la universidad de Maryland, propuso también la amplificación de la emisión estimulada y, al año siguiente, los rusos mencionados anteriormente, Basov y Prokhorov, escribieron un artículo explorando mucho más a fondo el concepto. Desde entonces, a Weber se le ha pasado a conocer mejor por sus investigaciones en otro campo, el de la detección de ondas de gravedad basándose también en otra antigua idea de Albert Einstein.

Estas son las fechas oficiales correspondientes a la primera parte de la carrera del láser. Pero acaso el hecho más significativo tuviese lugar en el banco de un parque de Washington DC durante la mañana del 26 de abril de 1951. Charles H. Townes se encontraba en Washington para asistir a una reunión de físicos y compartía la habitación de su hotel con Art- hur Schawlow. En realidad, Townes asistía a una conferencia en la que se hablaba de ondas milimétricas y Schawlow tomaba parte en otra reunión. Uno de los grandes intereses de Townes consistía en generar ondas cortas

para sus investigaciones, que era algo que no había logrado todavía. Townes, casado y con hijos menores, estaba acostumbrado a levantarse temprano, mientras que Schawlow, soltero, solía levantarse tarde. Cuando Townes se despertó por la mañana temprano, con el fin de no molestar a Schawlow, decidió ir a dar un paseo. Y fue precisamente en un banco del parque de Franklin, de Washington, donde se le ocurrió la gran idea. Se dio repentinamente cuenta de las condiciones necesarias para amplificar la emisión estimulada de microondas. Como hemos visto con anterioridad, las microondas son ondas electromagnéticas muy cortas, como, por ejemplo, las que se utilizan en ciertos tipos de hornos. No se trata de ondas luminosas, y sin embargo la revelación de Townes tuvo una importancia sumamente trascendental para el láser.



Charles H. Townes (izquierda), en compañía de James P. Gordon, junto a su segundo máser de amoníaco, desprovisto de la tapa lateral para mostrar el interior del mismo. En el fondo se encuentra T. C. Wang junto al primer máser de amoníaco. Esta fotografía fue tomada a mediados de los años 50. Charles H. Townes

La idea de Townes, según sus propias palabras en aquella época, «sólo parecía factible en parte», Siguiendo el método tradicional de los catedráticos de física, formuló el problema en forma de tema para una tesis y se lo ofreció a James P. Gordon, alumno licenciado de la universidad de Columbia. Tres años más tarde, Gordon, Townes y Herbert Zeiger habían logrado construir en Columbia el primer máser (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación).

Durante los años siguientes proliferaron los máseres. Debido a que la física de éstos era fascinante, el nuevo campo atrajo a numerosos investigadores, pero por desgracia se encontraron pocas aplicaciones para los aparatos en cuestión. Una de sus utilidades consiste en amplificar las señales que los radioastrónomos reciben del espacio lejano, y en las comunicaciones por medio de satélite, y se usan además como medida de frecuencias en los relojes atómicos de ultraprecisión. Sin embargo, la gama de frecuencias que amplifica es excesivamente limitada para la mayoría de las aplicaciones electrónicas. Los físicos deseaban ir más allá, y no tardaron en comenzar a investigar otras zonas del espectro electromagnético, en especial las longitudes de onda de la luz infrarroja y visible. Y así comenzó la gran carrera.

LA CARRERA EN POS DEL PRIMER LÁSER

Entonces fue cuando comenzó a ganar interés... y empezaron las querellas. En septiembre de 1957, Townes esbozó un proyecto para la construcción de un «máser óptico» que emitiría luz visible. Y se puso en contacto con su viejo amigo Arthur Schawlow, que entretanto había abandonado la universidad de Columbia para trabajar en los laboratorios Bell y había dejado de ser soltero al contraer matrimonio con la hermana de Townes. Entre ambos desarrollaron un plan detallado para la construcción de un láser.

Gordon Gould entra en escena, Gould era estudiante licenciado de la facultad de física en la universidad de Columbia, donde Townes ejercía de catedrático. En realidad, el laboratorio que utilizaba se encontraba a pocos metros del despacho de Townes, y generalmente se le ha descrito como alumno suyo, pero eso equivale a tergiversar los hechos. Townes ha aclarado que en cierta ocasión le dio algunas clases, pero que no era

su alumno, dado que no dirigía su investigación. Puesto que Gould y Townes llegarían eventualmente a disputarse los derechos de cierta patente, la naturaleza de la relación que existía entre ambos es trascendental. En realidad, Gould era alumno de Polykarp Kusch, ganador del premio Nobel.

Gould admite que se inspiró en el máser y en las ideas de Townes. Estaba obsesionado por la idea de construir un artefacto que emitiese luz en lugar de microondas, pero, puesto que no logró que Kusch aceptase el proyecto para su doctorado, decidió emprenderlo por cuenta propia. En noviembre de 1957, transcurridos apenas dos meses desde que Townes hubiera esbozado su máser óptico, Gould comenzó a describir su propia idea para la construcción de un aparato semejante utilizando —al parecer por primera vez— el término *láser.* Prosiguió con la exposición de sus planes para la construcción de un láser y aprovechó la oportunidad para hacer algunas proféticas declaraciones. Gould asegura que admitió, antes de que lo hicieran otros pioneros del láser, que sería posible conseguir densidades de energía hasta entonces inalcanzables. Puntualizó que la segunda ley de termodinámica no limita el brillo del láser. Dicha ley afirma que la temperatura de una superficie calentada por un haz procedente de una fuente de radicación térmica no puede exceder la temperatura de la fuente. Gould comprendió que el láser sería una fuente de luz *no* térmica y, por consiguiente, capaz de generar temperaturas muy superiores a la suya. En la práctica, esto significa que un láser que opere a temperatura ambiente es capaz de producir un haz que llegue a fundir el acero. Un haz de luz láser debidamente focalizado podría ser utilizado para generar una fusión termonuclear, según pronosticó Gould en sus notas, además de afirmar que el láser podría emplearse para establecer comunicaciones con la luna.

Tras completar sus notas, Gould se dirigió al propietario de una confitería de Nueva York llamado Jack Gould, con el que no tenía parentesco alguno, para que las certificase en calidad de testigo. Una reproducción de la primera página certificada del cuaderno de Gordon Gould se exhibe hoy en la Smithsonian Institution.

Aproximadamente durante aquellos días, Townes llamó por teléfono a Gould para pedirle información relacionada con la lámpara de talio, sobre cuyo estudio preparaba su tesis doctoral. La excitación del talio está relacionada con la excitación de electrones que tiene lugar en el

láser, o de lo que en aquella época era el *propuesto* láser. Sería importante conocer el momento justo en que tuvo lugar dicha conversación, punto sobre el que Townes y Gould no están de acuerdo. Gould afirma que había completado ya sus notas, pero Townes asegura que, según sus fichas, la llamada tuvo lugar unas tres semanas antes de que Gould escribiese sus primeras notas sobre el láser. Gould dice que dedujo de la conversación que Townes trabajaba sin duda en el mismo proyecto que él. Townes asegura que explicó a Gould lo que estaba haciendo, pero afirma que Gould no le dijo nada en aquellos momentos sobre sus planes.

En todo caso, Gould se apresuró a visitar a un abogado especializado en patentes, que no supo comprender la importancia del láser y le dio la errónea impresión de que tenía que resumir sus ideas a un nivel más práctico para poder patentarlas. Dadas las circunstancias, optó por no solicitar ninguna patente en aquellos momentos y esperó hasta abril de 1959.

Sin embargo, Townes y Schawlow sí lo hicieron. Transcurridos unos siete meses, durante el verano de 1958 solicitaron las patentes y mandaron un detallado informe a la prestigiosa revista *Physical Review*, la cual lo publicó en diciembre de 1958. Gould, además de no solicitar inmediatamente la patente correspondiente, cometió el error de no publicar sus planes para la construcción de un láser en alguna revista científica, que es lo que suelen hacer los científicos con el fin de que sus colegas reconozcan sus ideas originales.

Gould abandonó la universidad de Columbia sin doctorarse y se fue con sus ideas a una pequeña empresa de Syosset, Nueva York, llamada TRG Inc. La TRG utilizó las ideas de Gould en una propuesta a la Agencia de proyectos de investigación avanzados del departamento de Defensa (ARPA), que más adelante se denominaría Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA). Lo que más le interesó al ejército fue el potencial calorífico del láser, y los planes de Gould para adaptar el láser a funciones bélicas causaron tal impacto en el Pentágono que en 1959 decidieron otorgar un millón de dólares a la TRG en lugar de los 300.000 que la empresa había solicitado.

EL SECRETO Y LA CAZA DE ROJOS

El Pentágono estaba también lo bastante impresionado con las ideas de Gould como para proteger la investigación de la TRG con un minucioso cerco de seguridad, y los militares no tardaron en identificar un importante riesgo constituido por el propio Gordon Gould. A principios de los años cuarenta, Gould había coqueteado superficialmente con el marxismo o, según sus propias palabras, en aquella época «había contraído matrimonio con una mujer que se hizo comunista» y que en la actualidad ya no es su esposa. Esto ocurrió cuando trabajaba en el proyecto Manhattan, es decir, el que desarrolló la bomba atómica. El y su esposa formaban parte de un grupo de estudio marxista dirigido por un delator del FBI. Según Gould, el individuo en cuestión era un provocador a sueldo a quien el FBI había obligado por medio del chantaje a convertirse en delator para la Agencia y a persuadir a cierta gente a que se uniesen al grupo. El interés de Gould hacia el socialismo acabó en desilusión cuando, en 1948, la Unión Soviética se apoderó de Checoslovaquia. Su esposa no compartía sus sentimientos y optaron por separarse.

Sin embargo, Gould no lograría evitar la persecución que su breve asociación con el marxismo había desencadenado. En 1954 fue expulsado del colegio de la ciudad de Nueva York, donde trabajaba como profesor, y asegura que fue objeto de persecuciones por parte de «individuos como McCarthy». Y cuando en 1959, en plena guerra fría, la ARPA otorgó su contrato a la TRG, el historial de Gould bastó para que se le negase el permiso necesario desde el punto de vista de seguridad. No se le permitió que trabajase en su propio proyecto.

Gould no abandonó la TRG, pero se vio obligado a trabajar separado de sus colegas, que disponían del permiso necesario. Había dos edificios: uno para quienes tenían permiso y otro para quienes no lo tenían. Gould trabajaba en el segundo. Los investigadores del primero podían formularle preguntas, pero no estaban autorizados a hablarle de lo que hacían. Sin embargo, Gould asegura que no le resultaba difícil estar al corriente de sus actividades a juzgar por las preguntas que le formulaban. «Pero de lo que no cabe duda», agrega, «es de que causaba retrasos considerables». Gould también se queja de las dificultades que supone atraer prestigiosos científicos cuando no se les puede explicar en qué consiste el trabajo que se realiza.

Townes y Schawlow no contaron con tal «ayuda» por parte del Gobierno, y por consiguiente pudieron dedicarse a trabajar tranquilamente en el desarrollo del láser en la universidad de Columbia y en los laboratorios Bell, respectivamente. Había también otros equipos que se esforzaban en construir un láser lo antes posible. Recordemos que, a pesar de que Townes, Schawlow y Gould habían solicitado patentes y elaborado varias detalladas propuestas, y de que algunos rusos habían hecho otro tanto, hacia finales de los años cincuenta nadie había construido en realidad ningún láser. En aquella época se suponía que los gases constituirían los mejores elementos para la acción del láser; sin embargo, a todos les aguardaba una gran sorpresa.

LA SORPRESA DE MALIBU

Entre quienes observaban el ajetreo reinante, se encontraba un físico de los laboratorios de investigación de la compañía aérea Hughes, en Malibu, California, llamado Theodore H. Maiman. Este había estado utilizando un rubí sintético como cristal para un máser y lo había estudiado con suma atención. Otros investigadores habían llegado, en general, a la conclusión de que el rubí no constituía el material adecuado para el láser debido a las características de los átomos en el interior del cristal, pero los cálculos de Maiman le convencieron de que sería apropiado.

Trabajando solo y sin ayuda alguna por parte del Gobierno, Maiman construyó un pequeño artefacto que consistía en un cristal cilíndrico de rubí de un centímetro aproximado de diámetro, rodeado de una lámpara espiral intermitente. Los extremos de la barra de rubí habían sido cubiertos con el fin de que actuasen como espejos, condición necesaria para la oscilación del láser. Cuando el cristal recibía ráfagas de luz de unas millonésimas de segundo de duración, producía breves pulsaciones de luz láser.

El 7 de julio de 1960, Maiman comunicó a la prensa que había hecho funcionar el primer láser. Tan pequeño era el aparato, de unos escasos centímetros de longitud, que el encargado de relaciones públicas de la empresa Hughes no permitió que los periodistas lo fotografiasen y les ofreció en su lugar la fotografía de otro artefacto que todavía no había funcionado, pero que le parecía más impresionante debido a su mayor

tamaño. En la era de las microcomputadoras y de los circuitos integrados, su actitud parece curiosa, pero en los años sesenta la mayor parte de los equipos electrónicos se construían todavía con voluminosas válvulas y de algún modo, lo mayor parecía mejor.

El láser de Maiman producía unos 10.000 vatios de luz, pero duraba escasamente unas millonésimas de segundo en un momento dado y correspondía a un extremo tan rojo del espectro luminoso que era casi invisible. Se precisaban delicados instrumentos para comprobar que las pulsaciones no eran simplemente fluorescentes, sino que correspondían a un tipo de luz que nadie había visto hasta entonces: la luz láser. La era del láser acababa de comenzar.

Lamentablemente, las implicaciones del descubrimiento de Maiman no fueron evidentes en aquellos momentos para los redactores de una de las más prestigiosas publicaciones en su campo, la *Physical Review Letters.* Tras haber decidido en 1959 que los progresos en la física de los máseres ya no merecían ser publicados con urgencia (función primordial de la *Physical Review Letters),* optaron por rechazar el informe de Maiman.

La segunda publicación de su elección era la prestigiosa, aunque menos especializada, revista británica *Nature,* donde en 1960 se apresuraron a publicar el artículo de Maiman que constaba escasamente de 300 palabras y constituía, por consiguiente, el más sucinto informe jamás divulgado sobre un importante descubrimiento científico. A pesar de su brevedad, el artículo permitió que se repitiese la hazaña de Maiman en varios laboratorios.

COMIENZA EL GRAN AUGE

Después de estudiar el trabajo de Maiman, los demás investigadores dirigieron rápidamente su atención a la construcción de otros modelos de láseres. Al principio, el progreso era lento. Durante el año 1960 se construyó el primer láser de gas y dos nuevos modelos de cristal, uno de los cuales era de Schawlow. En 1961 se descubrieron dos nuevos tipos de láser, uno de ellos debido al equipo de Gould de la TRG Inc. Al igual que el de Maiman, funcionaba por bombeo óptico, pero el material activo era vapor de cesio (un metal).

El verdadero auge comenzó en 1962, y en 1965 la actividad del láser había sido observada en mil longitudes de onda diferentes, y ello sólo en los gases. Fueron muchos los que comenzaron a estudiar las posibles aplicaciones de los láseres a partir del momento en que se descubrieron. Una de ellas consistía en calcular la distancia a la que se encontraban ciertos objetos, y los militares no tardaron en aprovecharla para determinar la posición de los blancos. Los investigadores de los laboratorios Bell, entre otros, empezaron a estudiar su aplicación en el campo de las comunicaciones, como habían previsto en todo momento Townes y Schawlow.

La fabricación comercial de los láseres tampoco se hizo esperar. Una de las primeras empresas en el nuevo campo fue la Korad Inc., fundada por Maiman en Santa Mónica, California, en 1962. No tardaron en aparecer otras. Muchas fracasaron y algunas son todavía pequeñas empresas con un puñado de empleados. Entre las que han logrado un gran éxito se encuentra Spectra-Physics Inc., radicada en Mountain View, California, cuyas ventas exceden los 100 millones de dólares anuales y sus acciones se cotizan en la Bolsa de Nueva York.

Pronto comenzaron los pioneros del láser a cubrirse de honores. En 1964, Townes, Basov y Prokhorov compartieron el premio Nobel de física. A Townes se le otorgó la patente del máser, que, puesto que cubría toda amplificación por emisión estimulada fuere cual fuese la longitud de onda, afectaba también al láser. Townes y Schawlow compartieron una patente básica sobre el láser (es decir, un artefacto que opere especialmente en longitudes de onda ópticas e infrarrojas). A Maiman se le otorgó una patente por su láser de rubí y al fin consiguió hacerse con una suma considerable de dinero al vender su participación en Korad Inc. a la Union Carbide Corporation.

EL RETORNO DE GORDON GOULD

Entretanto, Gordon Gould parecía haberse esfumado. Townes y Schawlow estaban en posesión de la patente que él esperaba conseguir, habiéndosele anticipado en casi nueve meses. Cuando intentó que se reconociesen sus derechos a la solicitud de 1959 se vio involucrado en cinco costosas y prolongadas acciones judiciales, propias del procedi-

miento utilizado por la oficina de patentes de Estados Unidos para determinar a quién corresponden los derechos de un invento determinado. En la primera de sus acciones, Gould se estrelló contra la patente de Townes y Schawlow. Esencialmente quedó desacreditado, y además se ganó la antipatía de numerosos miembros de la comunidad científica, debido al prestigio de los hombres a quienes se enfrentaba. A continuación Gould perdió otras dos batallas parecidas, pero ganó otras dos que, más adelante, constituirían las bases de las demás patentes que le iban a otorgar. A fin de cuentas su compañía había pagado 300.000 dólares en gastos judiciales y la mayor parte de sus solicitudes habían caído en el olvido. En 1977 recuperó de su compañía el derecho de sus patentes y comenzó a insistir en las solicitudes personalmente. A la postre, incapaz de seguir financiando sucesivas batallas legales, Gould cedió parte de sus derechos de patente a una agencia de licencias y patentes de Nueva York llamada Refac Technology Development Corporation, a cambio de que la agencia se comprometiese a seguir tramitando las solicitudes.

Los esfuerzos de Refac se vieron coronados al fin por el éxito. El 11 de octubre de 1977 le fue otorgada una patente a Gould relacionada con la técnica del bombeo óptico, que según hemos aclarado en el capítulo 3 es necesaria para el funcionamiento de muchos láseres. En 1979, Gould recibió una segunda patente que, al igual que la del bombeo óptico, hundía sus raíces en la solicitud de 1959 y cubría una amplia gama de aplicaciones del láser.

Cuando Gould recibió su patente relacionada con el sistema de bombeo óptico, el asombro fue enorme en la industria del láser. Las patentes de Townes y Schawlow acababan de caducar y los fabricantes de láseres creían que ya no se verían obligados a seguir pagando derechos por la utilización de conceptos básicos sobre el láser. Entre aquellos a quienes afectaban las nuevas patentes se encontraban numerosos fabricantes de láseres industriales, así como otros de aplicaciones bélicas basados en el sistema de bombeo óptico, y cuando Refac les exigió el 5 por ciento manifestaron que no estaban dispuestos a aceptar la validez de las patentes en cuestión. Apenas acababa de ser otorgada la primera patente, cuando se presentó una denuncia por uso indebido del sistema de bombeo óptico contra la empresa denominada Control Láser Corporation, de Orlando, Florida, pero a los cuatro años no había llegado todavía el caso a los tribunales.

Lo más probable es que el caso acabe ante el Tribunal Supremo, puesto que se trata de uno de los más complejos de la historia jurídica de Estados Unidos. Junto a las 18 densas páginas donde se describe la propia patente se encuentra un tomo de 500 páginas detallando la historia legal de dicha patente, que debe ser cuidadosamente estudiado con el fin de determinar la validez.

Las complejidades del caso incluyen al mismo tiempo enmarañadas cuestiones técnicas y minuciosos puntos jurídicos. Para que una patente resulte válida, la información contenida en ella debe ser lo suficientemente detallada como para que alguien que disponga de los conocimientos y los recursos necesarios en el momento de presentar la solicitud sea capaz de construir el artefacto descrito en ella. Sin embargo, Maiman ha puntualizado que Schawlow, Townes o Gould no habían construido ningún láser cuando solicitaron sus respectivas patentes, ni lo hicieron tampoco en un futuro inmediato. Por otra parte, transcurridos más de veinte años (a principios de 1981), Gould y un colega suyo construyeron un láser sirviéndose exclusivamente —según Gould— de la información que aparecía en la solicitud de su patente y demás información e instrumentos del dominio público en el momento en que dicha patente fue solicitada en 1959.

Apenas había acabado Gould de construir su láser y se disponía a mostrarlo ante los tribunales cuando surgió una nueva complicación. En el ejemplar de *Science* correspondiente al 3 de abril de 1981 apareció un informe de un grupo de científicos del Goddard Space Flight Center de la NASA, encabezado por Michael Mumma, según el cual habían detectado amplificación láser por bombeo óptico en la atmósfera de Marte. El equipo de Mumma descubrió que la luz del sol produce una inversión de población en el dióxido del carbono entre 75 y 90 km sobre la superficie de Marte, creando emisión estimulada amplificada —es decir, lo que nosotros denominamos amplificación láser— en la gama infrarroja. La Control Láser Corporation recibió la noticia con verdadero deleite, afirmando que el descubrimiento demostraba que la amplificación láser por bombeo óptico era un fenómeno natural y por consiguiente no patentable. Y así quedó el caso en el momento de ultimar los detalles de este libro, dejando que sean los tribunales de justicia quienes resuelvan un sinfín de dilemas jurídicos y tecnológicos.

Las solicitudes de patente más recientes de Gould están también plagadas de complejidades. El caso comenzó cuando Refac decidió entablar un pleito con una pequeña empresa canadiense denominada Lumonics Research Inc., que se dedica a la fabricación de sistemas láser para grabar diversos objetos. Entonces, la General Motors decidió intervenir en defensa de Lumonics, y ahora parece haberse hecho cargo de la defensa del caso. La GM alega que la patente no es válida, puesto que no se trata más que de una extensión de un arte ya existente, que se remonta «al año 212 a de J.C., cuando Arquímedes incendió la armada romana que sitiaba Siracusa sirviéndose de una lupa». Eso es «patentemente ridículo» arguye Eugene M. Lang, presidente de Refac.

En esta situación se dan finalmente dos paradojas. Townes forma parte del consejo de administración de la General Motors, si bien la empresa asegura que no tomó parte en la decisión de intervenir en el pleito. Además, fue Townes el primero en observar en 1973, las emanaciones infrarrojas de la atmósfera de Marte, que en 1980 y con la colaboración de dos colegas, el equipo de Mumma demostraría que procedían de amplificación láser.

TEMAS DELICADOS

Uno de los factores que ha contribuido al difícil reconocimiento de las contribuciones de Gould al desarrollo del láser, es el hecho de que no se ajustase a los procedimientos tradicionales de la comunidad científica. Se espera que los científicos se ocupen de patentar sus descubrimientos, pero también que describan sus investigaciones sin pérdida de tiempo en alguna publicación científica, con el doble propósito de informar a los demás científicos y establecer la prioridad de su trabajo. Para justificar el hecho de no haberse ajustado a dichas normas, Gould habla de presiones cronológicas, el conflicto potencial entre publicar y obtener patentes extranjeras, y el hecho de que, a causa de los militares, gran parte de su información constituía un secreto de Estado. Lo ocurrido ha contribuido (y sigue haciéndolo) a que el papel de Gould en la historia del láser cayese parcialmente en el olvido.

Existe también otro aspecto sumamente delicado que hace referencia al trato de los estudiantes licenciados dedicados a la investigación. Mu-

chos estudiantes se inspiran en ideas brindadas por sus catedráticos, pero también se da el caso de ciertos miembros de la facultad que están dispuestos a apropiarse las ideas de sus alumnos. Townes asegura que la mayoría de las ideas plasmadas en el cuaderno de Gould, así como en las solicitudes de sus patentes, son meras ampliaciones de las descripciones que Townes le ofreció en su día. Gould, por su parte, alega que sus ideas son originales. Es posible que los tribunales saquen sus propias conclusiones, pero es improbable que jamás resuelvan el asunto de una forma definitiva.

A nivel personal todavía existe un evidente rencor entre ambos científicos. Townes nos dijo en fechas recientes que, en su opinión, son muchos los que han contribuido enormemente al desarrollo del láser, pero agregó que Gould no era uno de ellos. Gould afirma que Schawlow es «un individuo muy agradable», pero, aparte del comentario críptico «supongo que tiene sus necesidades», se niega a hablar de Townes. Cuando le preguntamos a Schawlow qué opinión le merecía Gould, el físico, por lo general repleto de jovialidad, se incomodó visiblemente y admitió que las solicitudes de patentes de Gould habían logrado disgustarle.

La concesión de las patentes le ha proporcionado a Gould satisfacción emocional y financiera. Al vender finalmente la parte que le correspondía de las patentes, ha conseguido 300.000 dólares al contado y dos millones de dólares en obligaciones. Los compradores son también personajes curiosos en el juego de las patentes; se trata de una empresa de Ardmore, Pennsylvania, que se denominaba Panelrama Corporation, y que con el fin de realizar la compra liquidó una cadena de tiendas al por menor que trabajaba con pérdidas. Entonces Panelrama cambió de nombre y pasó a llamarse Patlex Corporation, puesto que esencialmente sus intereses en las patentes de Gould constituyen su único negocio. En el caso de que dichas patentes entren en vigor, Patlex, Gould, Refac y los abogados de Nueva Jersey que se ocupan del caso compartirán los derechos reales, que podrían llegar a representar decenas o incluso centenares de millones de dólares durante el período en que se hallen en vigor las patentes. El propio Gould estima que dichas patentes podrían reportar unos 10 millones de dólares anuales, y su validez se extiende a lo largo de diecisiete años. Sin embargo, numerosos observadores en el mundo del láser creen que las solicitudes son excesivamente abstractas para tener validez y que

incluso la patente relacionada con el bombeo óptico puede desmoronarse ante un concertado ataque jurídico.

Al igual que la mayoría de los pioneros del láser, Gould se ha dedicado a otros campos. En la actualidad, con sus sesenta años ya cumplidos, es vicepresidente de una pequeña empresa de Gaithersburg, Maryland, que se dedica a la fabricación de equipos destinados a comunicaciones por fibra óptica y que se denomina Optelecom Inc. Su cliente más importante es el ejército, pero Gould espera que llegue el día en que el beneficio de sus patentes le permita decidir el campo en el que desee investigar, sin tener que preocuparse de los deseos de los militares. Ahora que ha logrado la concesión de sus patentes, Gould ha comenzado a recibir premios tales como el de inventor del año, otorgado por la Asociación en pro del progreso de la invención y la innovación. Sin embargo, a Gould ya poco le importa. «Nada tienen que ver esas patentes con mi orgullo», asegura, «aunque me gustaría sacarles algún dinero».

Tanto Townes como Schawlow han seguido brillantes carreras en el mundo académico y ambos han recibido innumerables premios. Townes es catedrático de física en la universidad de California, en Berkeley, y desde hace algún tiempo se ocupa primordialmente de radioastronomía y radiaciones infrarrojas, utilizando máseres y láseres para ciertos aspectos de su trabajo. Schawlow es catedrático de física en la universidad de Stanford, y utiliza láseres como herramientas para el estudio de las propiedades de la materia, sin ocuparse de los propios láseres. Gracias a su trabajo, Schawlow compartió con Nicolaas Bloembergen —físico de la universidad de Harvard que también participó activamente en el desarrollo inicial del láser— el premio Nobel de física de 1981. Schawlow estaba de un humor excelente cuando hablamos con él el día en que se dio a conocer la noticia, puesto que ya no se vería obligado a aclarar que no había recibido ningún premio Nobel, como comúnmente, se suponía debido a su estrecha cooperación con Townes en el desarrollo del láser.

Después de muchos años en Korad Inc., Maiman acabó también distanciándose de los láseres. Intentó abrirse camino en varios campos y durante varios años trabajó como asesor independiente antes de unirse a la TRW Inc. en calidad de vicepresidente encargado de tecnología y nuevas empresas. Muchos otros pioneros del láser, tales como Gordon, Zieger y Weber, han abandonado a su vez la investigación activa en dicho campo.

Entre los primeros investigadores, los que siguen más estrechamente vinculados con la investigación del láser son Basov y Prokhorov. Basov es director del instituto de física Lebedev, de Moscú, y miembro del Parlamento soviético. Prokhorov es subdirector del instituto Lebedev. Ambos científicos dirigen grandes equipos dedicados a la investigación relacionada con el láser y sus nombres aparecen con regularidad en los artículos sobre dicho campo.

5. LA MEDICINA LASER: UNA FELIZ PROMESA

Cualquier descubrimiento en el campo médico va seguido siempre de dos sensacionales relatos en los medios de difusión.

El primero es optimista y aparece bajo el título de «La esperanza de… en el cual los puntos suspensivos serían sustituidos por el nombre de un nuevo medicamento o terapéutica, tanto si se trata de una vacuna contra la gripe como de cirugía torácica. Transcurridos algunos años, a menudo es necesario escribir una nueva historia con el título de «Los peligros de...», donde el lugar de los puntos suspensivos se ve ocupado por el mismo nombre.

No nos proponemos hacer aquí otro tanto. Nuestro propósito no consiste en despertar falsas esperanzas que puedan derrumbarse en un futuro próximo. Los láseres representan, en realidad, una nueva esperanza para numerosos pacientes. Sin embargo, esa feliz promesa no es por el momento más que eso, una promesa. Los láseres han demostrado su utilidad en algunos campos de la medicina, sobre todo en ciertos aspectos de la cirugía ocular y en ginecología, pero están muy lejos de haberse convertido en la panacea que muchos artículos recientes proclaman.

Veinte años después de la invención del láser, los profesionales de la medicina no han decidido todavía cómo utilizarlo. Se han usado láseres experimentalmente en una variedad inmensa de aplicaciones médicas, desde la cirugía hasta la eliminación de tatuajes, o desde la acupuntura hasta la fundición de material dental. Según un informe procedente de Israel, unos médicos de aquel país se han servido de un láser para circuncidar a un muchacho de doce años que padecía hemofilia.

El problema estriba en que el láser se ve obligado a competir con una inmensa gama de técnicas alternativas que se han desarrollado en el campo de la medicina. A no ser que el láser aporte ciertas ventajas considerables con relación a otros procedimientos, no se adoptará su uso. La razón principal es la inercia de los médicos que se sienten satisfechos con los métodos que utilizan; pero, además, otra razón importantísima es su elevado coste. Un láser para aplicaciones quirúrgicas generales cuesta como mínimo 50.000 dólares, lo que representa un precio mil veces superior al de un buen bisturí. El precio de un equipo láser diseñado para

aplicaciones oftalmológicas es de unos 30.000 dólares, y el más barato de los láseres utilizados en medicina para la práctica de la acupuntura cuesta 3.500 dólares, o sea, un precio todavía muy superior al de las simples agujas.

Los láseres «no reemplazarán por completo al bisturí ni suplantarán la electrocauterización (el uso de una descarga eléctrica para quemar alguna fibra y soldar vasos sanguíneos)», afirmó un miembro de la facultad de medicina de la universidad de California en Los Angeles, en un informe sobre las aplicaciones del láser en la medicina. «Sin embargo», prosiguió, «facilitará procedimientos terapéuticos para ciertos problemas que permitirán que mejore el cuidado de los pacientes». Los hechos confirman la aserción de Richard M. Dwyer.

En las páginas siguientes hablaremos de ciertos estudios importantes y a la vez de gran atracción. Puesto que en este capítulo nos ocupamos de la salud corporal, su contenido causará un mayor impacto personal que cualquier otra parte del libro. No obstante, conviene tener en cuenta que el hecho de que afirmemos que es *posible* conseguir ciertos resultados con el láser no significa que uno pueda exigirle a su médico que se los aplique. Gran parte de lo que se describe se halla todavía en estado experimental y debe ser sometido a numerosas pruebas antes de que se generalice su uso. Además, la utilización de láseres por parte de los profesionales de la medicina requiere una preparación especial de la que carecen la mayoría de ellos. Incluso el más experto de los cirujanos sería incapaz de llevar a cabo con éxito una intervención quirúrgica sirviéndose de un láser sin haber recibido una preparación adecuada. En el caso de que deseen que les apliquen alguno de los tratamientos descritos a continuación, sugerimos que consulten a su médico de cabecera, con el fin de que les informe dónde es posible hallar un especialista en medicina láser. Si su médico no puede facilitarles dicha información, les aconsejamos que se dirijan al hospital clínico (es decir, vinculado a alguna facultad de medicina) más cercano, donde acostumbra a llevarse a cabo el trabajo experimental y clínico relacionado con los láseres.

EL NACIMIENTO DE LA CIRUGÍA DEL LÁSER

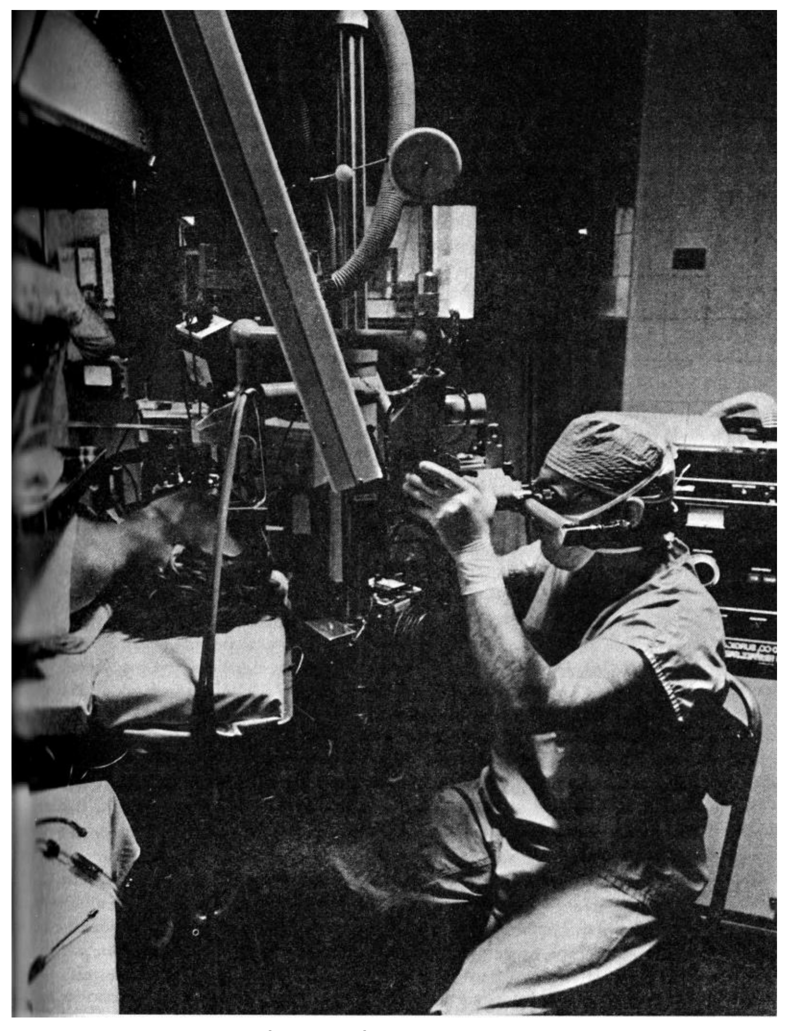
Uno de los primeros centros de investigación de las aplicaciones del láser en el campo médico, fue fundado en la facultad de medicina de la universidad de Cincinnati a principios de los años sesenta por un dermatólogo llamado León Goldman, que no tardó en convertirse en un entusiasta de la medicina del láser. Con sus 70 años cumplidos, Goldman sigue trabajando en el Hospital Hebreo de Cincinnati, donde practica y promueve el uso del láser. Es, además, presidente de la Sociedad norteamericana de medicina y cirugía láser, organizada en gran parte por él.

Los primeros experimentos, así como el instrumental utilizado, eran eminentemente toscos comparados con los actuales. Con el fin de comprobar el efecto del láser sobre la piel humana, el doctor Goldman dirigía un haz de luz láser contra su propio brazo. Después de repetir la misma operación centenares de veces, llevó a cabo otros experimentos con sus pacientes, con lo que logró identificar muchos campos de investigación que se estudian todavía en la actualidad.

La práctica de la cirugía por medio del láser fue la primera idea que se les ocurrió a los médicos, en especial para realizar operaciones delicadas que no podían practicarse con un bisturí. Goldman y sus colegas no tardaron en descubrir que con la ayuda de la luz del láser se podían curar numerosos desórdenes de la piel. Asimismo abrieron otras posibilidades tales como las de cicatrizar heridas o úlceras y la utilización del láser para tomar medidas y formular diagnósticos.

A Goldman le horroriza que todavía se diga que la aplicación del láser en medicina carece de pruebas definitivas, y asegura que «para operaciones de la laringe, cirugía gastrointestinal con hemorragia (como la de úlceras abiertas), manchas de la piel de nacimiento inoperables y ciertos tumores del cerebro el uso de los láseres es *esencial*». Al utilizar la palabra *esencial*, Goldman quiere decir que los láseres no sólo *pueden* sino que también *deben* ser utilizados en dichos casos, a pesar de que admite que sus recomendaciones son parciales, puesto que reflejan la opinión de su propia organización, es decir la «Sociedad norteamericana de medicina y cirugía láser». Asimismo asegura que el uso del láser es «obligatorio» en la cirugía ginecológica, en particular para el tratamiento temprano del cáncer propio de las mujeres. Sin embargo, incluso el propio Gold-

man recomienda precaución tanto a pacientes como a médicos: «Si el láser no le es indispensable, no lo utilice.»



Un cirujano opera con un láser de dióxido de carbono. Por ser su haz invisible, se utiliza un láser de helio-neón para indicar la dirección de aquél. Coherent Inc

La cirugía representa la aplicación más espectacular del láser, como lo mostró la película titulada *La fuga de Logan.* Ahora bien, el láser no era lo suficientemente espectacular para satisfacer a los productores de Hollywood, puesto que uno de los atractivos principales de la cirugía láser consiste en el hecho de que, al cortar, el haz cauteriza al mismo tiempo los pequeños vasos sanguíneos y por consiguiente evita prácticamente toda hemorragia. En tal caso, ¿por qué los pacientes en la película sangraban durante las operaciones? En realidad, los productores cinematográficos hicieron caso omiso de los consejos de su asesor técnico, Chris Outwater y decidieron que, si hay cirugía, debe haber sangre.

En las auténticas intervenciones por medio de láser se evita prácticamente toda hemorragia, debido a la forma en que el haz se interrelaciona con la fibra orgánica. Ésta es la razón que indujo a ciertos médicos en Israel a circuncidar a un muchacho con la ayuda de un láser, puesto que, tratándose de un hemofílico, su sangre no habría coagulado debidamente de haber sido intervenido con un bisturí. La mayoría de los láseres utilizados en cirugía son de dióxido de carbono y emiten un haz de unos 50 vatios, en una longitud de onda de 10 micrómetros en la gama infrarroja. Su potencia no es muy superior a la de una bombilla ordinaria de la que emana conjuntamente luz visible e infrarroja, pero el haz puede focalizarse en un diminuto punto de unos 40 micrómetros (0,04 mm). Además, la luz con una longitud de onda de 10 micrómetros es absorbida con gran fuerza por el agua de las células vivas. La combinación de alta intensidad y elevado poder de absorción, es lo suficientemente potente para vaporizar las células en el punto focal.

El cirujano puede utilizar el láser de dos modos distintos. Cuando desea perpetrar un corte profundo, focaliza el haz sobre un pequeñísimo punto y lo desplaza lentamente a lo largo de una línea, de forma que se produzca la incisión por volatilización de una finísima línea de fibra orgánica. Para destruir fibra de la superficie, el cirujano focaliza el láser con menor intensidad y hace que el haz se desplace con rapidez de un lado a otro sobre la zona que desea tratar. Por fortuna, las células humanas conducen el calor con gran dificultad, gracias a lo cual las fibras próximas a la zona tratada por el láser no sufren daño alguno. El proceso de volatilización, hace que se cierren automáticamente (o cautericen) la mayoría de los vasos sanguíneos con un diámetro inferior a 0,5 mm, evitando que se produzcan hemorragias. Sin embargo, las venas y arterias

con un diámetro superior al indicado deben ser cauterizadas al igual que en la cirugía convencional.

El láser propiamente dicho es excesivamente voluminoso para ser manipulado por el cirujano, de ahí que permanezca en posición estacionaria. Un brazo especial, similar en apariencia al del taladro de los dentistas, transmite el haz láser a un instrumento focalizador que el cirujano manipula como lo haría con un bisturí convencional, y dispone además de un interruptor al alcance del pie para conectar o desconectar el aparato.

El brazo que se utiliza en los láseres de dióxido de carbono consiste en una serie de tubos rígidos dotados de varios espejos que reflejan la luz del uno al otro hasta alcanzar al paciente. A los láseres que emiten ondas de menor longitud, tales como los de argón, cuya luz es de un color azul verdoso, o los de neodimio, que emiten un haz infrarrojo invisible, se les puede adaptar un sistema mucho más sencillo consistente en un tubo flexible relleno de fibras ópticas especiales, en lugar del engorroso brazo articulado. De esta forma se transmite la luz al lugar deseado a través de un cabezal focalizador (o bien *objetivo)* situado al final del tubo en cuestión. A pesar de que el sistema de fibra óptica resulta mucho más práctico que el del brazo articulado, en la actualidad no es capaz de transmitir la luz en la longitud de onda producida por un láser de dióxido de carbono.

Otro problema que presenta este último modelo de láseres consiste en que su haz es invisible, y por consiguiente el cirujano no sabe hacia dónde se dirige. Con el fin de solventarlo, los fabricantes de láseres quirúrgicos acoplan un segundo láser de helio-neón de baja potencia que emite un haz rojo. Ambos haces de luz siguen la misma ruta óptica de espejo en espejo para focalizarse finalmente en el mismo punto. De ese modo, el haz rojo de baja potencia indica al cirujano el lugar exacto donde se practicará la incisión cuando conecte el invisible haz infrarrojo.

La mayoría de los láseres quirúrgicos están dotados, además de otros accesorios esenciales. En la práctica, es probable que se requieran diversos cabezales o objetivos de enfoque, puesto que cada cabezal está diseñado para cumplir una sola función quirúrgica. Los cabezales en cuestión son de poco peso y de tan fácil manipulación para el cirujano como un bisturí convencional. La incorporación de un microscopio permite al cirujano utilizar la excelente focalización del láser en la práctica de la microcirugía. Un tercer accesorio consiste en un aspirador a través del

cual se eliminan el vapor, el humo y otras partículas flotantes producidas por la cauterización de la fibra orgánica.

Estos aparatos son bastante caros. Aunque el coste de un láser de dióxido de carbono oscila tan sólo entre los 10 y los 20 mil dólares, un equipo completo basado en él asciende a unos 50.000 dólares, a causa del elevado precio de los accesorios. A pesar de que, debido a su elevado coste, la mayoría de los cirujanos no disponen de los equipos mencionados, los láseres quirúrgicos son bastante comunes en los hospitales clínicos asociados a las principales facultades de medicina.

El elevado precio del material hace que su uso quede limitado a ciertos tipos de cirugía, donde el láser ofrezca considerables ventajas con relación a los demás procedimientos convencionales. En esta categoría se incluyen la microcirugía, las operaciones en fibra orgánica donde abunden los vasos sanguíneos y las intervenciones en zonas donde no se disponga de espacio suficiente para manipular un bisturí, pero sí un haz láser. Los mejores ejemplos son la cirugía ginecológica y las intervenciones otorrinolaringológicas. Las operaciones propiamente dichas son semejantes a las intervenciones quirúrgicas convencionales, a excepción de que, por lo general, se llevan a cabo en pequeña escala, es decir en la garganta o el oído, por ejemplo, en lugar de hacerlo en el tórax. Al paciente se le aplica anestesia general o local al igual que en la cirugía convencional. Ciertas operaciones láser, en especial las oculares y las ginecológicas, se practican a menudo en el propio consultorio del cirujano. Si ustedes presenciasen dichas operaciones, podrían comprobar que se diferencian considerablemente de las convencionales en cuanto que, como hemos mencionado con anterioridad, no existe apenas derramamiento de sangre, y en su lugar aparecerían, sin duda, vapores procedentes de la cauterización de fibra orgánica. Tal vez también lograsen ver cierta luz difuminada en el caso de que se utilizase un láser de luz visible, ya fuese en su calidad de instrumento «cortante» ya fuese sencillamente como guía.

CIRUGÍA GINECOLÓGICA

Los tejidos del útero y de la vagina son particularmente susceptibles de contraer cáncer y otras enfermedades. Son zonas muy sensibles rega-

das por abundantes vasos sanguíneos. Y, por desgracia, constituyen lugares de difícil acceso para el cirujano. Para agravar todavía más la situación, algunos cánceres y tumores precancerosos se esparcen sobre la superficie de dichos tejidos en lugar de localizarse en un solo punto.

Estas son precisamente las condiciones ideales para el láser. En la cirugía convencional sería necesario cortar con un bisturí por debajo del tejido afectado, causando una extensa herida y perdiendo, por lo general, una abundante cantidad de sangre. Con un láser, el cirujano se limita a barrer la zona afectada con la suficiente lentitud para quemar el tejido infectado y, puesto que el haz láser puede alcanzar lugares donde no cabría el bisturí, la incisión que se practique podrá ser de menor tamaño. Además, el láser cauteriza al cortar, cerrando por consiguiente numerosos vasos, con lo que evita la pérdida de mucha sangre y adormece las terminaciones nerviosas, reduciendo la sensación de dolor (evidentemente, el paciente está anestesiado durante la operación, pero sigue siendo deseable minimizar el trauma durante la intervención, con el fin de que el dolor sea menor durante el período de convalecencia).

Muchas de las mujeres cuyas madres, para evitar abortos, fueron sometidas durante el embarazo a un tratamiento de dietilestilbestrol (DES), contraen un extraño tipo de cáncer que puede ser tratado eficazmente con el láser. Desde los diez hasta los treinta años, muchas mujeres que habían estado expuestas al DES antes de nacer (frecuentemente denominadas hijas del DES) desarrollan células anormales —por lo general consideradas precancerosas— en la vagina, y esa situación, en muchos casos, conduce al cáncer vaginal o uterino. La irradiación láser constituye en la actualidad un método aceptado para la destrucción de dichas células anormales y cánceres situados en la superficie de los órganos citados o muy cerca de ellos.

«La mayoría de esas intervenciones quirúrgicas ginecológicas pueden practicarse sin necesidad de hospitalizar al paciente», afirma Michael S. Baggish, especialista en tocología y ginecología del hospital de Mount Sinai, en Hartford, Connecticut. En un informe en el que resume tres años de tratamiento láser aplicado a unos trescientos pacientes, ha declarado que los desórdenes periódicos, tales como los relacionados con el DES, pueden ser tratados una y otra vez con el láser «sin llegar a formar prácticamente cicatriz alguna». Además ha llegado a la conclusión de que «los excelentes resultados funcionales y cosméticos aportan benefi-

cios emotivos, así como ventajas físicas a los pacientes tratados con láser». También ha asegurado que, gracias a que la cirugía láser es sencilla y requiere tan sólo anestesia local en la mayoría de los casos, puede utilizarse para tratar a pacientes embarazadas o cuyo estado de salud sea harto precario para soportar una anestesia general o una intervención quirúrgica de mayor envergadura.

OPERACIONES DE LA GARGANTA Y DEL OÍDO

Al igual que la vagina, la garganta o el oído constituyen lugares de difícil acceso para el bisturí del cirujano. Además, son órganos delicados que pueden ser lastimados con facilidad por la cirugía convencional.

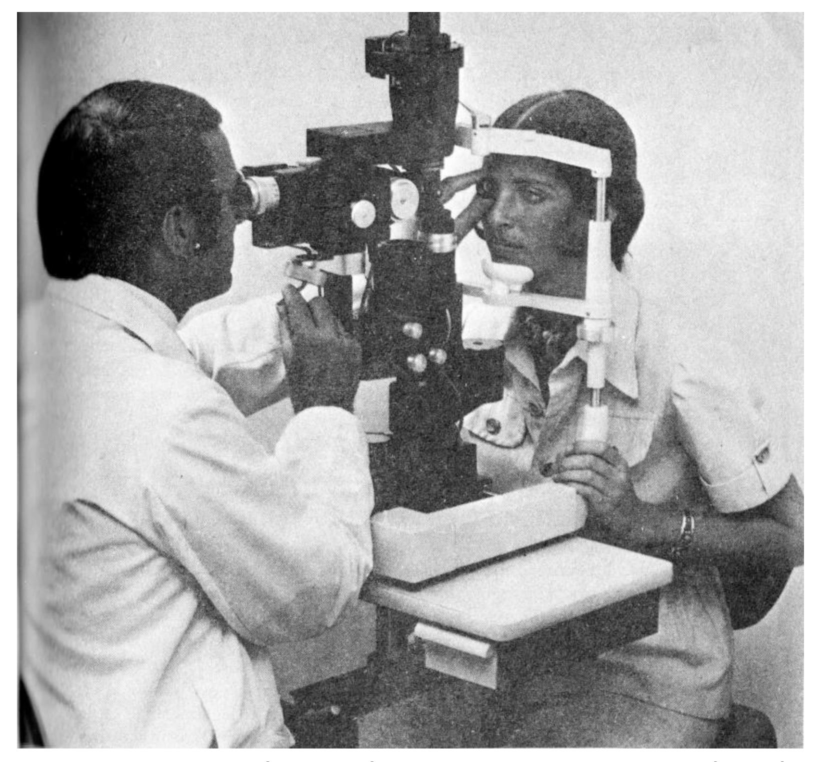
Una zona en extremo delicada es la de la laringe o cavidad vocal. En el caso de que sus diminutas estructuras internas sufran algún daño, la capacidad de hablar podría verse severamente afectada, a pesar de lo cual los cirujanos que han tratado cánceres de la laringe se han visto a menudo obligados a extirpar el órgano en su totalidad. Sin embargo, hoy los láseres han sido aceptados para practicar intervenciones en dicha zona.

Con la ayuda del láser, el cirujano puede cauterizar lesiones incluso de dimensiones tan reducidas como 1 mm de diámetro sin lastimar el resto de la laringe, lo que permite que los pacientes puedan hablar de una forma más inteligible que el ronco susurro que producen cuando se les ha extirpado la totalidad de la laringe.

Los láseres también pueden utilizarse en el interior de una cavidad del cuerpo cuyas dimensiones son todavía más reducidas: el oído. Rodney Perkins, cirujano de Palo Alto, California, afirma que, sirviéndose de cierto tipo de microcirugía láser, ha logrado que unos veinte pacientes recobrasen el oído, y en la actualidad intenta desarrollar nuevas técnicas quirúrgicas.

Perkins se sirve de un láser de argón que emite un haz de color azul verdoso, en lugar de utilizar el láser infrarrojo de dióxido de carbono comúnmente usado en la cirugía mencionada. El láser de dióxido de carbono es más potente, pero el de argón es adecuado para las delicadas intervenciones de oído, y además se maneja con mayor facilidad. Según Perkins, sus ventajas consisten en la mayor capacidad de maniobra que sus pequeños objetivos de luz visible permiten, la menor dimensión de su

punto focal, mejor coagulación de la sangre y mayor precisión gracias a su visible haz de luz. Asimismo es más barato. Aunque el precio de un láser de argón es similar al de los de dióxido de carbono, los accesorios ópticos son mucho más sencillos y por consiguiente más baratos, de forma que el coste total del sistema asciende a unos 30.000 dólares, mientras que el de dióxido de carbono sería de unos 50.000.



Este aparato contiene un láser de argón para el tratamiento de la retinopatía diabética, principal causa de la ceguera. Coherent Inc

Perkins logra que sus pacientes recobren el oído vaporizando partes de los estribos defectuosos en el oído interno. El estribo es uno de los huesos que transmiten vibraciones al oído interno, y el endurecimiento de

los demás huesos del oído puede llegar a inmovilizarlo, reduciendo gravemente la capacidad auditiva.

Con anterioridad, los cirujanos solían utilizar diminutos picos y escarpas para extraer los huesos inmovilizados, pero se exponían a dañar permanentemente el oído y a causar prolongados mareos. En la actualidad, Perkins vaporiza parte del hueso con un láser y extrae cuidadosamente el resto con unas pinzas. Con su procedimiento no sólo evita dañar el delicado oído interno, sino que también el láser reduce considerablemente la pérdida de sangre, debido, por una parte, al hecho de que cauteriza automáticamente la herida, y por la otra a que la apertura quirúrgica es mucho menor que en los métodos convencionales. En Estados Unidos se realizan miles de operaciones anuales de esta índole, pero no puede decirse que su reciente técnica se haya popularizado todavía.

PREVENCIÓN DE LA CEGUERA. DOS OPERACIONES OCULARES

El láser ha demostrado ser una eficaz herramienta para detener, en el peor de los casos, el progreso de cierta enfermedad que se ha convertido en la causa más común de la ceguera en Estados Unidos. Se trata de la retinopatía diabética, así denominada porque consiste en la degeneración de la retina —es decir, la zona sensible a la luz situada en la parte posterior del glóbulo ocular—, que afecta a los diabéticos. La pérdida de la visión obedece a la proliferación de vasos sanguíneos en la superficie de la retina. Los vasos pueden perjudicar a la vista sea porque al cubrir la retina impidan el paso de la luz, sea porque al romperse, puesto que sus paredes son delgadas y frágiles, derramen la sangre en el fluido interno del ojo, causando quizás una pérdida total de la visión.

La solución consiste en destruir los excesivos vasos sanguíneos dirigiendo un haz de luz láser (cuya exposición debe estar cuidadosamente controlada) a la zona afectada de la retina. Los especialistas todavía debaten entre sí el modo en que opera dicha técnica. Según una teoría, el haz de luz es fuertemente absorbido por la sangre, y su luz genera un proceso de coagulación en el interior de los vasos que acaba por destruirlos. Por lo general se utiliza un láser de argón, debido a que su luz de color azul verdoso es absorbida en gran medida por los vasos sanguíneos.

El tratamiento no es —ni mucho menos— eficaz en todas las ocasiones. Conocemos el caso de dos diabéticos que quedaron prácticamente ciegos a los treinta años a pesar de haber recibido tratamiento láser. Sin embargo, el Instituto nacional ocular, en un estudio nacional con 1.700 pacientes de 15 centros médicos, descubrió que el tratamiento láser aplicado a lo largo de dos años a pacientes aquejados de retinopatía diabética podía reducir la incidencia de ceguera en más de un cincuenta por ciento. Eso no significa que el láser sea algo milagroso, puesto que el mismo estudio descubrió que el tratamiento con un arco voltaico de xenón era tan eficaz como el del rayo láser.

No obstante, los oftalmólogos prefieren el láser, acaso debido a que se controla con mayor facilidad. El instrumental necesario cuesta unos 30.000 dólares, y los médicos pueden utilizarlo con facilidad en su propio consultorio sin necesidad de internar al paciente.

Se utiliza una técnica similar para tratar el desprendimiento de retina. Antes de que existiesen los láseres, dicho accidente constituía un problema de difícil solución que requería la inmovilización del ojo o una delicada intervención quirúrgica. Algunos médicos habían intentado generar impulsos luminosos de suficiente intensidad para causar fotocoagulación y formar una cicatriz que fijase la retina desprendida a la parte posterior del glóbulo ocular. Poco después del descubrimiento del láser, W.M. Zaret comprobó que éste facilitaba la aplicación de dicha técnica en gran manera.

Al igual que en el tratamiento de la retinopatía diabética, el láser que se utiliza en estos casos es el de argón.

DESTRUCCIÓN DE ÚLCERAS HEMORRÁGICAS

Los pacientes con severas hemorragias intestinales pueden ahora beneficiarse de dos inventos relacionados con la luz: el *endoscopio* y el láser. El endoscopio es un tubo luminoso que permite que el médico examine visualmente el interior del estómago y de otras zonas del cuerpo de su paciente. A pesar de que la idea del endoscopio no es original, los modelos primitivos carecían de utilidad práctica debido a su excesiva rigidez, y sólo se ha convertido en un eficaz mecanismo a partir del descubrimiento de las *fibras ópticas* (fibras de cristal cuya propiedad consis-

te en conducir la luz a lo largo de ellas, aun cuando se doblen, de las que se hablará con más amplitud en el capítulo 6). Los endoscopios de fibra óptica son lo suficientemente pequeños y flexibles como para que el médico los introduzca por la garganta del paciente y examine visualmente el interior de su estómago, o por el ano con el fin de examinar los intestinos. Gracias a la aplicación a algunas de las fibras de una fuente luminosa exterior se iluminan las regiones interiores del cuerpo y el médico observa la luz que refleja el interior del estómago (o cualquier otro órgano) a través de las demás fibras.

En el tratamiento de úlceras, los médicos utilizaron al principio los endoscopios para averiguar la naturaleza y la extensión del problema en el estómago del paciente; sin embargo, para corregirlo, se veían obligados a recurrir a la cirugía convencional.

El problema estriba en que, con cirugía convencional, el pronóstico generalmente no es muy halagüeño. Los pacientes que sufren graves hemorragias internas a menudo no están en condiciones de ser sometidos a intervenciones quirúrgicas de gran envergadura, y la mayoría de las técnicas no quirúrgicas carecen de eficacia.

La nueva solución consiste en servirse del endoscopio no sólo en calidad de instrumento de diagnóstico, sino también quirúrgico, puesto que sus fibras son capaces de transmitir la luz de algunos tipos de láser, además de la luz ordinaria. El médico localiza la úlcera problemática a través del endoscopio sirviéndose de luz ordinaria, y entonces proyecta un haz láser a través de las fibras ópticas, con el fin de coagular la sangre y detener la hemorragia.

Las fibras ópticas de que se dispone en la actualidad funcionan mejor con luz de la gama visible o casi visible del espectro, y por consiguiente no permiten el uso del láser de dióxido de carbono comúnmente utilizado en cirugía. La fotocoagulación interna por medio de láser fue descubierta, independientemente, por el equipo de Richard M. Dwyer de la facultad de medicina de Los Angeles, en la universidad de California, y el equipo formado por Peter Kiefhafer, G. Nath y K. Moritz en la clínica médica de Innenstadt, en Munich, Alemania Occidental. Los primeros experimentos se llevaron a cabo con un láser de argón, pero los alemanes no tardaron en descubrir que se podían conseguir mejores resultados con un láser cristalino de YAG y neodimio. El hecho de que la técnica láser para el tratamiento de hemorragias intestinales goce de mayor aceptación en

Europa occidental que en Estados Unidos se debe, por lo menos en parte, a las restrictivas normas de seguridad vigentes en Norteamérica.

El precio de un equipo láser de YAG y neodimio para la fotocoagulación gastrointestinal es de casi 50.000 dólares, pero para valorar debidamente su coste hay que tener en cuenta las seis mil muertes anuales causadas por graves hemorragias gastrointestinales sólo en Estados Unidos.

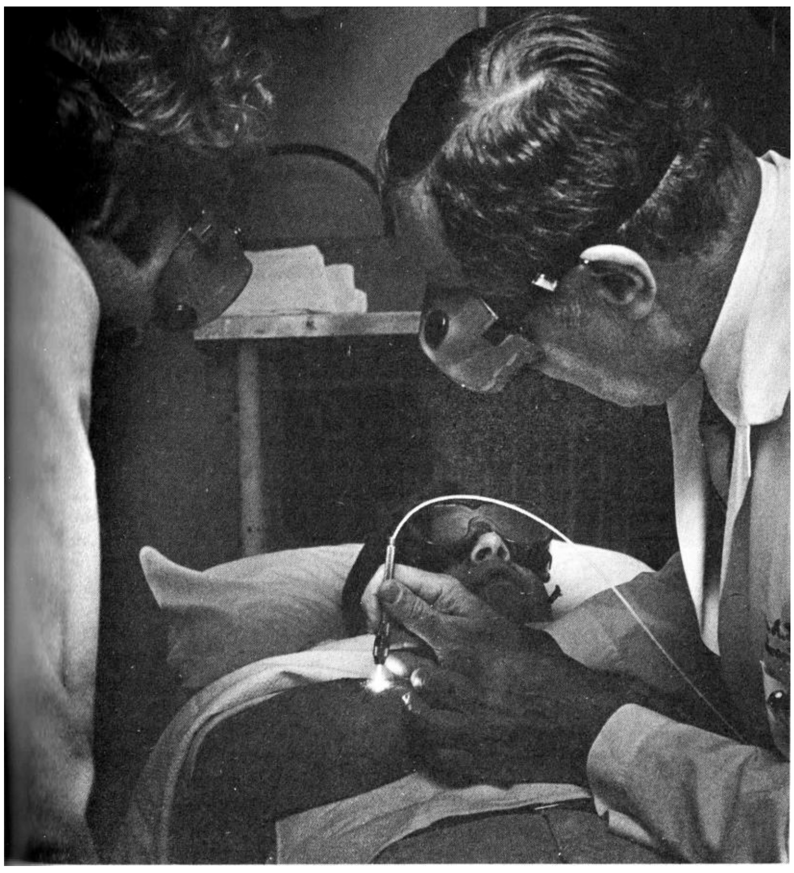
ELIMINACIÓN DE MARCAS DE NACIMIENTO Y TATUAJES

Uno de los pioneros de la medicina láser fue el dermatólogo León Goldman. Los dermatólogos, en general, fueron los primeros en darse cuenta de las posibles aplicaciones médicas del nuevo aparato.

Goldman rindió honores a la antigua tradición de la autoexperimentación al llevar a cabo pruebas no sólo con sus pacientes, sino también consigo mismo. No obstante, ciertos campos de la dermatología láser son todavía objeto de debate. Un ejemplo lo tenemos en ciertas manchas de la piel, los «antojos», que pueden producir desfiguraciones en el caso de que estén situadas en la zona del cuello o de la cara. El color rojo se debe a su anormal densidad de vasos sanguíneos, y aunque, en algunos casos, el proceso de fotocoagulación con un láser de argón puede reducir la intensidad de su color al obturar algunos de los vasos existentes, en otros, el tratamiento láser puede producir una coloración indeseable (incluso cicatrices, en gente de complexión pálida).

También es posible eliminar tatuajes con la ayuda de un láser. El haz desintegra o decolora las tintas del tatuaje, que al ser más oscuras absorben una mayor cantidad de luz que la piel circundante. Los resultados son comparables a los que se obtienen utilizando otras técnicas. Sin embargo, los demás tratamientos, entre los que se incluye la excoriación de la piel pigmentada, la extirpación de la zona afectada y la destrucción del tatuaje por medio de ácidos, pueden producir efectos secundarios de tal gravedad que el láser representa una atractiva alternativa, a pesar de que no está tampoco desprovisto de efectos secundarios. Al igual que en los casos mencionados de las manchas del color del vino tinto, cabe la posibilidad de que el tratamiento láser produzca una coloración indeseada o incluso cicatrices.

A pesar de que León Goldman asegura haber tratado con éxito centenares de casos de manchas de la piel inoperables, el problema primordial del tratamiento láser de manchas y tatuajes —común también a otros tantos campos de la medicina— consiste en no tener una certeza absoluta de lograr los resultados deseados.



El médico de la fotografía se sirve de un láser para eliminar un tatuaje del brazo del paciente. El haz vaporiza el tinte del tatuaje. Durante la operación se utilizan gafas protectoras para prevenir cualquier exposición accidental de los ojos. University of Utah Medical Center

CICATRIZACIÓN RÁPIDA DE HERIDAS

La iluminación con un haz láser de baja potencia de ciertas heridas de la piel puede contribuir a acelerar su proceso de cicatrización. Más de un centenar de úlceras crónicas de la piel, es decir, de heridas que no cicatrizan por sí solas, han sido curadas al ser expuestas repetidamente a un haz de luz láser de baja potencia en la clínica quirúrgica del departamento de investigación de la facultad de medicina de Budapest, Hungría. La técnica fue perfeccionada en dicha clínica por Endre Mester sirviéndose de láseres de helio-neón que emiten luz roja, o láseres de argón cuya luz es de color azul verdoso. Uno de los problemas consiste en el hecho de que las exposiciones deben ser muy prolongadas. Cada sesión puede llegar a durar una hora, y el tratamiento ha de repetirse semanalmente durante varios meses.

La luz del láser puede también endurecer el tejido que se forma sobre las cicatrices cutáneas. Los resultados de los experimentos que Mester ha llevado a cabo con ratas han sido corroborados por los de otros similares realizados por Kendric Smith en el departamento de radiología de la universidad de Stanford. Sin embargo, sigue sin comprenderse tanto la mecánica de la cicatrización de heridas como la del endurecimiento del tejido, y no se ha divulgado el uso de dichas técnicas.

ACUPUNTURA LÁSER

Por extraño que parezca, se utilizan haces de luz láser de baja potencia para estimular los puntos de presión de la acupuntura tradicional. Esta nueva técnica se está popularizando enormemente en Europa occidental y en menor medida también en China. La moda de la acupuntura convencional con agujas se divulgó durante los años setenta, a partir del momento en que China estableció comunicaciones con el resto del mundo, y la acupuntura láser no tardó tampoco en divulgarse, pese a que, al parecer, no se trata de una idea exclusivamente china. Cierta indicación de la popularidad alcanzada por dicha técnica nos la ofrece el hecho de que se hayan vendido unos 2.000 equipos láser para la aplicación de la acupuntura primordialmente en Europa occidental.

Aunque la acupuntura láser se practica en diversos lugares de China, parece ser que sus centros principales son las grandes ciudades, en espe-

cial Shanghai, que es uno de los centros de investigación láser, y Pekín (Beijing). Ciertos médicos chinos afirman que los láseres son más eficaces que las agujas. Cuando se practica la acupuntura en los puntos de presión de los dedos de los pies, con el fin de estimular la rotación del feto durante los últimos tres meses del embarazo, por ejemplo, los investigadores chinos afirman que el procedimiento surte el efecto deseado en un 80 ó 85 por ciento de los casos con láseres, y sólo un 70 por ciento con agujas.

La acupuntura láser se ha utilizado también para tratar a pacientes aquejados de bronquitis crónica y asma bronquial. Liu Pingyi y tres de sus colegas del Hospital popular de la facultad de medicina de Pekín afirman que, gracias al tratamiento láser, han logrado aliviar los síntomas asmáticos de sus pacientes en un 72 por ciento de los casos tratados. Los mejores resultados los obtuvieron con los pacientes de menos de treinta años de edad, un 90 por ciento de los cuales experimentaron alguna mejoría. Sin embargo, conviene destacar que estos resultados son preliminares, puesto que hasta julio de 1980 sólo habían recibido el tratamiento 58 pacientes.

¿Por qué utilizar un láser en lugar de agujas? Johannes Bischko, director del instituto de acupuntura Bolzmann de Viena, afirma que el método resulta popular debido a que no produce dolor alguno, es higiénico y rápido. En su opinión, la acupuntura láser es la única forma de acupuntura aceptable para niños y adultos de temperamento nervioso. La popularidad de la acupuntura en Europa queda reflejada en el número de pacientes. En un hospital del centro de Viena llamado Poliklinik son tratados con acupuntura entre 10.000 y 15.000 pacientes anuales, de los cuales, según el doctor Bischko —que se ocupa del servicio de acupuntura para pacientes externos del hospital—, un treinta por ciento aproximadamente recibe tratamiento láser en lugar de agujas.

La potencia del láser utilizado es en general tan baja que el paciente ni siquiera percibe el calor del rayo. Nadie se explica cómo simula el haz láser los efectos de las agujas de acupuntura, pero, por otra parte, tampoco se comprende con claridad cuáles son los mecanismos fisiológicos que inducen la rotación del feto en el interior de la matriz por medio de la acupuntura convencional. Algunos practicantes de la acupuntura tradicional no han perdido su escepticismo con relación al sistema láser y numerosos profesionales de la medicina ortodoxa siguen sin confiar en

ningún tipo de acupuntura. Por otra parte, la Administración estadounidense de alimentos y medicamentos no ha reconocido oficialmente que la acupuntura láser constituya una técnica eficaz; sin embargo, la autoridad de dicha organización se limita al control de ventas de instrumentos médicos, y no a las acciones individuales de los doctores que los utilicen.

El mayor fabricante de equipos de acupuntura láser es Messerschmitt-Bölkow-Blohm, de Munich, empresa de Alemania occidental más conocida por sus productos aeroespaciales. El sistema completo —el corazón del cual es un láser de helio-neón de baja potencia cuyo precio asciende a unos doscientos dólares— cuesta aproximadamente 3 500 dólares, y se ha vendido en numerosos países, entre los que se incluyen Alemania Occidental, Suiza, Austria, Inglaterra, Francia, Estados Unidos, Corea del Sur y Japón. Los tratamientos de acupuntura láser suelen consistir, por lo general, en tres o cuatro sesiones, con un coste para el paciente que oscila entre 10 y 100 dólares por sesión.

BIOPSIAS LÁSER

Los láseres se utilizan en la actualidad no sólo para tratar enfermedades, sino también para diagnosticarlas. El cáncer uterino es uno de los más comunes entre las mujeres, y su pronta detección es esencial para detenerlo. La biopsia uterina, que consiste en la extracción de una pequeña cantidad de tejido del útero para ser examinado microscópicamente en el laboratorio con el fin de descubrir posibles síntomas de cáncer, ha representado un avance muy considerable en dicho campo. Sin embargo, el procedimiento no está desprovisto de problemas. Un número muy elevado de muestras debe ser analizado por técnicos especializados, para detectar tan sólo algunos casos de cáncer, y en algunas ocasiones les resulta difícil diferenciar entre una severa inflamación y un principio canceroso, causando, como es de suponer, innecesarios sufrimientos en los casos de diagnósticos erróneos.

En la universidad de Rochester, León Wheeless y sus colegas han descubierto una solución. La primera parte de su procedimiento es idéntico al de una biopsia convencional, pero después agregan un colorante fluorescente a la muestra de tejido extraído. El colorante en cuestión, que manifiesta su fluorescencia bajo los efectos de la luz láser, es absorbido

en una proporción mucho mayor por las células que contienen una elevada cantidad de DNA, y puesto que las células cancerosas no dejan de producir DNA y de dividirse, pueden ser fácilmente detectadas por el láser.

El equipo de Wheeless hace fluir una pequeña cantidad de líquido en el que se encuentran algunas de las células a las que se ha aplicado el colorante ante un haz láser y, controlando la fluorescencia producida en varias longitudes de onda, logran detectar las células cancerosas o las afectadas por otras anormalidades.

Se pretende utilizar la técnica de Rochester para llevar a cabo un examen preliminar de grandes cantidades de muestras y seleccionar aquellas que manifiesten alguna anormalidad, con el fin de que las examine un técnico especializado en el laboratorio. Dado que la mayoría de las muestras no manifiestan anormalidad alguna, el procedimiento permite que se reduzca considerablemente el volumen de análisis que deben realizar los técnicos. Wheeless asegura que el nuevo método se ha demostrado lo bastante sensible como para que no le pase desapercibida ninguna célula cancerosa, y ahora se ha propuesto reducir el índice de falsas alarmas —los casos en que una célula normal se identifica como anormal—, que en la actualidad es aproximadamente de una entre 1.200 para que sea como máximo de una entre 2.000.

Básicamente, el mismo fenómeno, es decir el del colorante fluorescente absorbido por células cancerosas, es utilizado en una nueva y espectacular técnica china. Sin embargo, los investigadores chinos que trabajan en una clínica de Shanghai, al contrario de los de Rochester, utilizan el láser directamente en los pacientes. En primer lugar, las mujeres que deben ser examinadas, cosa que puede efectuarse en el propio consultorio del médico, toman una píldora que contiene el colorante en cuestión, y al cabo de unas horas se les examina el útero con un haz láser de baja potencia. Un alto nivel de fluorescencia indica la presencia de cáncer.

La técnica china permite diferenciar con facilidad y sin temor a equivocarse las células cancerosas de una mera inflamación, con la ventaja adicional de que su interpretación es más sencilla que la de la biopsia, según han declarado unos médicos norteamericanos que visitaron recientemente China. Existe, sin embargo, un problema potencial: los propios colorantes fluorescentes son ligeramente carcinógenos y algunos investi-

gadores norteamericanos que habían considerado la posibilidad de utilizar una técnica semejante optaron por no hacerlo ante el peligro de los colorantes, según ha manifestado Wheeless.

TRATAMIENTO DEL CÁNCER

Hemos dicho con anterioridad que los láseres pueden utilizarse en calidad de bisturís para la extracción de ciertos tipos de tejidos cancerosos; pero existe, además, un tratamiento cuyo método es similar al de la detección del cáncer. En el Instituto Roswell Park Memorial de Buffalo, Nueva York, Thomas Dougherty ha realizado experimentos en los que animales e incluso personas han sido inyectados con colorantes. Después de que el colorante haya sido absorbido preferentemente por células cancerosas, se ilumina la zona afectada con un intenso haz de luz láser cuya longitud de onda sea fuertemente absorbida por el colorante utilizado, y de ese modo se destruyen las células cancerosas alcanzadas por la luz del láser.

Nadie sabe con certeza el porqué de lo ocurrido. Dougherty lo atribuye al efecto de los fragmentos moleculares que se producen cuando la luz descompone el colorante. Las células normales absorben una menor cantidad de energía porque contienen menos colorante, y pueden recuperarse sin haber sufrido daños permanentes. En el momento de escribir estas líneas, el trabajo de Dougherty se encuentra todavía en su etapa preliminar de experimentación.

LAS IMÁGENES HOLOGRÁFICAS Y LA ORTODONCIA

Los láseres pueden utilizarse para registrar imágenes tridimensionales con una técnica denominada *holografía,* de la que se hablará con más detalle en el capítulo 12. La holografía permite controlar los cambios temporales experimentados por objetos tridimensionales, tales como los efectos de las mordazas ortodónticas utilizadas por pacientes con los dientes mal alineados.

Desde el punto de vista de la ingeniería, las fuerzas que actúan sobre los dientes de dichos pacientes producen cierta deformación mecánica en el interior de la boca, cuyo movimiento es imposible medir por métodos

convencionales. Dichos movimientos tienen lugar en las tres dimensiones, con diferentes grados de variación en cada una de ellas, y se manifiestan sobre la totalidad de la superficie. Además, los movimientos son minúsculos y en algunas ocasiones alcanzan apenas unas milésimas de milímetro.

Una solución consiste en impresionar dos hologramas sobre una misma placa fotográfica. El primero de los hologramas mostraría, por ejemplo, el estado de la boca antes de que se le aplique la fuerza correctora, y el segundo reflejaría su estado después de ajustar la mordaza ortodóntica. La combinación de ambos hologramas muestra la deformación a lo largo de toda la superficie y la mide en las unidades de la longitud de onda de la luz láser utilizada para impresionar los hologramas. Los mecanismos que intervienen en la realización de dichas medidas se explican con mayor detalle en el capítulo 12. Los mismos principios de los que se sirve la ortodoncia pueden aplicarse al tratamiento de huesos fracturados o lesionados.

Hace algunos años, la revista científica *Applied Optics* publicó un artículo en el que un grupo de investigadores describían la forma de utilizar la holografía para verificar el movimiento de los dientes sometidos a la presión de mordazas ortodónticas. La investigación era interesante, pero la parte más memorable del artículo eran las fotografías que lo ilustraban. La triste expresión del rostro de los pacientes no se debía simplemente a que les hubiesen colocado mordazas en la boca, sino al hecho de que les habían tenido que pintar el interior de ésta con una pintura especial para poder impresionar los hologramas. Es posible que los lectores a quienes deba practicárseles alguna corrección ortodóntica se tranquilicen cuando sepan que la técnica mencionada todavía se utiliza exclusivamente en los laboratorios.

NIVEL DE LA MEDICINA LÁSER

Son muchísimas las cosas que ocurren en el campo de la medicina láser, y en este capítulo nos hemos limitado a mencionar algunas de ellas muy superficialmente, puesto que no disponemos de suficiente espacio para comentar todos los experimentos con láseres que se realizan con animales o incluso con seres humanos.

El láser cuenta con un futuro prometedor en medicina, si bien limitado. Aunque no ofrece curas milagrosas de ninguna temible enfermedad, es un instrumento de gran utilidad capaz de contribuir al tratamiento y diagnóstico de numerosas dolencias graves. A no ser que tenga lugar algún espectacular descubrimiento, de lo que no parece haber perspectiva alguna, lo más probable es que la mayoría de los lectores de este libro no reciban jamás tratamiento láser.

Salvo contadas excepciones —en particular la cirugía ginecológica y las dos formas de tratamiento ocular descritas anteriormente—, la medicina láser se encuentra aún en fase de investigación, y su aplicación no se ha generalizado todavía, pese a que muchos de los experimentos clínicos que se llevan a cabo se practiquen en seres humanos.

También cabe destacar que, en muchos casos, ciertos investigadores dudan de los resultados obtenidos, como, por ejemplo, en el caso de la dermatología láser y en particular de la eliminación de tatuajes. Dichas dudas estimulan a su vez la investigación, teniendo especialmente en cuenta que se tarda cierto tiempo en evaluar con el debido celo las nuevas técnicas terapéuticas y asegurarse de que no produzcan efectos secundarios perniciosos.

Incluso las técnicas consideradas eficaces no surten los efectos deseados en todos los casos. Por ejemplo, el 6,4 por ciento de los pacientes aquejados de retinopatía diabética que recibieron tratamiento láser durante un estudio llevado a cabo por el Instituto nacional ocular, perdieron la vista. No obstante, el Instituto recomienda con entusiasmo el uso del tratamiento láser, puesto que el 16,3 por ciento de los pacientes que durante el mismo período no lo recibieron la perdieron también.

ESPERANZA Y PROGRESO

Transcurridas dos décadas desde que comenzó la investigación láser en el campo de la medicina, el tema sigue apasionando. Además, ha madurado considerablemente. Los pioneros no disponían de datos que les sirviesen de punto de partida. No sabían qué efectos causaría un haz láser sobre la piel u otros tejidos del cuerpo, e intentaron averiguarlo exponiendo en algunos casos sus propios cuerpos, en un alarde experimental que hoy nos parece muy poco técnico. Los actuales investigadores dispo-

nen de una enorme cantidad de datos acumulados por dichos pioneros y por sus discípulos. Por otra parte, cuentan con mayor cantidad de equipos láser y de mejor calidad.

Sin embargo, los problemas persisten. Las elaboradas medidas de seguridad relacionadas con instrumentos médicos vigentes en Estados Unidos, así como la frecuente intervención de los tribunales de justicia en casos de uso indebido de las nuevas técnicas, tienden a entorpecer la adopción del láser en la medicina. También reducen la posibilidad de practicar experimentos clínicos, con nuevas técnicas en los seres humanos. Si bien dichas restricciones contribuyen a proteger a los pacientes ante la posibilidad de efectos secundarios insospechados, también dificultan el descubrimiento de nuevos y eficaces tratamientos. Por consiguiente, la medicina láser en Estados Unidos está quedando relegada a un segundo lugar con relación a Europa occidental, por lo menos en cuanto a su aplicación.

China progresa a pasos agigantados, a pesar de sus graves limitaciones. Los investigadores chinos, a quienes no les es fácil adquirir láseres, en algunos casos se ven obligados a fabricarlos ellos mismos o a dedicar mucho tiempo y esfuerzo para conseguir que alguien se los suministre. En su país escasean todavía los técnicos, debido a que durante la Revolución Cultural se cerraron todas las universidades a lo largo de casi una década. A pesar de lo cual, los médicos norteamericanos y europeos que han visitado China han podido comprobar que sus técnicas están muy avanzadas, a causa de que han puesto a prueba un mayor número de métodos con seres humanos que en cualquier otro país del mundo.

6. COMUNICACIONES LÁSER: HACIA LA ERA DE LA FIBRA ÓPTICA

Mucho antes de que la humanidad aprendiese a servirse de la electricidad, se utilizó la luz para establecer comunicaciones a larga distancia, ya fuese por medio de hogueras, señales de humo o focos luminosos desde la cima de las colinas. Incluso la invención del telégrafo no logró acabar con la idea de las comunicaciones ópticas. Ha transcurrido un siglo desde que Alexander Graham Bell estudiara la posibilidad de transmitir la voz humana mediante haces luminosos; sin embargo, fue su invento anterior —es decir, el teléfono— lo que marcó el tono de las comunicaciones durante el siglo pasado.

A lo largo de los dos últimos siglos se han perfeccionado sistemas que permiten transmitir mayor información en un espacio más reducido de tiempo. A través del teléfono se transmiten voces que desde un punto de vista científico representan una cantidad de información en una unidad determinada de tiempo superior a la del telégrafo, que en el mejor de los casos pueden llegar a transmitir algunas letras por segundo. La televisión, a su vez transmite una cantidad de información más de mil veces superior a la del teléfono.

Lo que ocurre en realidad es que existe una gran cantidad de información que deseamos transmitir, y esto supone un problema. La capacidad de una onda electromagnética para transportar información depende de su frecuencia, es decir, cuanto más elevada sea la frecuencia mayor será la cantidad de información que transmita. No obstante, la cantidad de información se ha incrementado a un ritmo superior al de los medios disponibles para transmitirla, creando el consiguiente atolladero.

Las comunicaciones a través de la luz nos ofrecen una solución al problema. Para transmitir conversaciones, los teléfonos operan a unas frecuencias que oscilan tan sólo entre los 1.000 y los 4.000 ciclos por segundo. La televisión utiliza frecuencias del orden de los 50 millones de ciclos. Sin embargo, la frecuencia de las ondas luminosas es de unos 800 *billones* de ciclos.

La transmisión teórica de información a través de la luz ha existido desde mucho antes de que se dispusiese de los medios prácticos para

llevarla a cabo. En primer lugar, se requería una fuente luminosa adecuada que no existió hasta el descubrimiento del láser. La segunda condición esencial consistía en disponer de un medio que permitiese la transmisión de la luz, y que no apareció hasta hace unos diez años en la forma de *fibra óptica,* es decir, un finísimo hilo de cristal que conduce la luz longitudinalmente. La combinación del láser, la fibra óptica y la tecnología electrónica pueden revolucionar nuestras comunicaciones en las próximas décadas interconectando las casas, los negocios y los gobiernos para dar paso a la «era de la fibra óptica».

EL TELÉGRAFO ÓPTICO Y EL FOTÓFONO

La ciencia de las comunicaciones rápidas a larga distancia comenzó hace casi dos siglos con el descubrimiento del telégrafo óptico. Su inventor fue Claude Chappe, ingeniero francés empeñado en establecer un sistema de comunicaciones rápidas y seguras durante los turbulentos años que atravesaba su país, a finales del siglo XVIII. Su sistema, que era sencillo, consistía en una serie de torres construidas sobre colinas encima de las cuales se instalaron postes verticales con vigas de madera móviles sujetas a ellos Las vigas cumplían la función de un semáforo en el cual a cada letra le correspondía una posición diferente. En cada torre había una viga que controlaba las señales de las torres adyacentes, que debían ser visibles. Dicho sistema llegó a contar con más de 500 torres a lo largo de más de 5 000 kilómetros.

Para poner en funcionamiento el telégrafo óptico se necesitaba muchísimo personal, e incluso en aquella época de mano de obra barata resultaba sumamente caro. Sin embargo, no dejó de ser el mejor sistema de comunicaciones existente hasta que fue reemplazado por el telégrafo eléctrico alrededor de 1850.

Un cuarto de siglo más tarde, Alexander Graham Bell resucitó la idea de la comunicación por medio de la luz cuando intentó transmitir conversaciones por vía luminosa al poco tiempo de haber inventado el teléfono Y en 1880 demostró lo que él consideraba, según se dice, su invento de mayor importancia: el fotófono.

El fotófono transmitía exclusivamente voces sirviéndose de un espejo fino y flexible que vibraba al recibirlos impulsos de las ondas sonoras.

Dichas vibraciones alteraban la dirección en que el espejo reflejaba la luz so lar, de forma que parte de la luz no alcanzase el receptor situado en la leja nía, y modulaban, por consiguiente, la luz de acuerdo con las alteraciones de la voz. La parte más difícil del proceso era la conversión de la luz modulada en una corriente eléctrica (función que correspondía a los predecesores de las actuales células fotoeléctricas), de forma que el fotófono pudiese servirse del mismo tipo de auricular que Bell había utilizado para el teléfono.

Bell y su asistente Summer Tainter llevaron a cabo con éxito sus primeros experimentos con el fotófono el 19 de febrero de 1880 en Washington D.C. Se realizaron también otros experimentos, pero a pesar de que Bell mejoró la calidad de los instrumentos, el fotófono seguía siendo poco práctico. Las nubes podían ocultar el sol e incluso, aunque se utilizase una fuente de luz artificial, la lluvia, la nieve o la niebla podía interrumpir los rayos luminosos.

Poco después de sus primeros experimentos, Bell guardó su fotófono original en la Smithsonian Institution, donde permaneció durante casi un siglo prácticamente olvidado.

Posteriormente ha habido varios intentos de utilizar el sistema de comunicaciones ópticas, siempre inútilmente hasta la aparición de los láseres y de las fibras ópticas. Ambas tecnologías despertaron de nuevo el interés en las comunicaciones ópticas, sobre todo en los laboratorios Bell, donde se llevaba a cabo uno de los programas de investigación más extensos del mundo en dicho campo. Dadas las circunstancias, recuperaron el fotófono original de Bell, y el 19 de febrero de 1980 repitieron los experimentos del inventor en el lugar donde había estado situado su laboratorio (convertido hoy en un aparcamiento) con la asistencia de representantes de los laboratorios Bell, la Sociedad geográfica nacional, la Smithsonian y un inventor y escritor llamado Forrest M. Mims III, de San Marcos, Texas, que había sido uno de los promotores principales del centenario del fotófono. (Paradójicamente existía en aquellos momentos un pleito entre Mims y los laboratorios Bell con relación a los derechos de un invento.)

LA APARICIÓN DEL LÁSER

Los científicos no tardaron en darse cuenta de las enormes posibilidades de aplicación del láser en el campo de las comunicaciones. Incluso con anterioridad a su primera manifestación los que comprendían el concepto hablaban ya de su utilidad en dicho campo, y otros siguieron sus pasos a partir de 1960, cuando efectivamente apareció el invento.

En agosto de 1962, Isaac Asimov hablaba del potencial de las comunicaciones ópticas en su columna mensual de la revista *The Magazine of Fantasy and Science Fiction*. En teoría, y según sus cálculos, utilizando la porción visible del espectro luminoso podrían llegar a transmitirse 100 millones de canales televisivos, mientras que la región ultravioleta podría ser utilizada para la transmisión de seis mil millones de canales adicionales. Sin embargo, cuando recordó la baja calidad de la programación agregó: «Imaginémonos cómo reaccionarían los linces de nuestra industria del espectáculo si se diesen cuenta de que disponían de cien millones de canales para ofrecemos nuevas variedades de inimaginable basura. ¡Quizá deberíamos detener el proceso inmediatamente!»

Los científicos raras veces escuchan a quienes les aconsejan que no prosigan, y los perfeccionadores de los sistemas de comunicación óptica tampoco lo hicieron. Instalaron láseres en sus laboratorios y comenzaron a descubrir de nuevo lo que Alexander Graham Bell había aprendido ochenta años antes, es decir, que la atmósfera no era un medio adecuado para la transmisión de la luz.

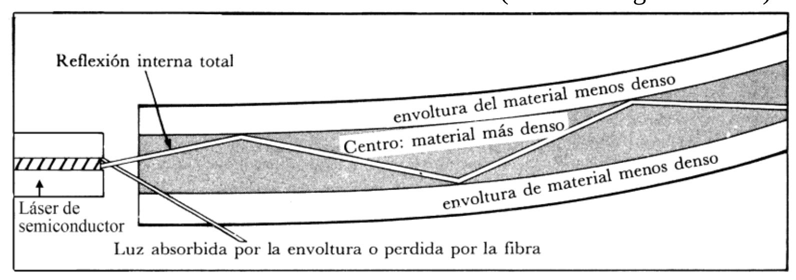
Entonces los investigadores de los laboratorios Bell comenzaron a interesarse por un invento patentado en 1934 por Norman R. French, llamado la «tubería luminosa». La expresión más sencilla de dicho invento consiste literalmente, en un tubo cuya superficie interior es reflectora (o reflectante). Si la cantidad de luz reflejada por la superficie es suficientemente elevada, un haz de luz introducido en el tubo se desplazará a lo largo de él, experimentando, no obstante, pequeñas pérdidas. No tardaron en aparecer propuestas de versiones más sofisticadas, tales como tubos que operasen en el vacío con el fin de evitar la absorción de la luz a través del aire, u otros con lentes internas que permitiesen refocalizar el haz de luz asegurándose que seguía el camino deseado.

Al mismo tiempo, otros investigadores estudiaban el espacio más allá de nuestra atmósfera, donde no hay aire que absorba ni disperse la luz.

La administración espacial norteamericana estudió la posibilidad de utilizar sistemas luminosos para comunicarse con los satélites desde la tierra, o para que los satélites se comunicasen entre sí. Los estrategas militares se interesaron también por las mismas ideas, en gran parte debido a que el fino rayo del láser les facilitaría un sistema de transmisión mucho más seguro que el de las ondas radiofónicas que se emiten en todas las direcciones... En estos momentos, el proyecto de mayor interés para los militares consiste en un sistema que utilizaría rayos láser de color azul verdoso y que permitiría la transmisión de información entre satélites y submarinos sumergidos.

EL AMANECER DE LA ERA DE LA FIBRA

Por lo general imaginamos que la luz se desplaza en línea recta; sin embargo, se han logrado construir finísimas fibras de cristal capaces de transmitir la luz por rutas curvas y sinuosas, de una forma que podría parecer similar a la capacidad de los cables de cobre para la transmisión de electricidad. El principio en el que se basan dichas fibras ópticas es un fenómeno denominado reflexión interna total (véase el diagrama N.° 7).



7. Las fibras ópticas se basan en un principio denominado reflexión interna total. Esto significa que cuando la luz se desplaza por el medio de mayor densidad e incide sobre el material menos denso con un ángulo reducido, como lo muestra el diagrama, la totalidad de la luz podrá ser re fie jada nuevamente hacia el medio denso. En la práctica las fibras ópticas se construyen con dos tipos de cristal, uno de mayor densidad en el centro y otro menos denso en la envoltura. Si la luz que se desplaza por el centro incide sobre la envoltura con un ángulo lo suficientemente reducido, es reflejada de nuevo hacia el centro y prosigue su camino a lo largo de la fibra incluso cuando esté doblada. Sin embargo si el ángulo es demasiado grande la luz es absorbida por la envoltura o simplemente perdida por la fibra.

Esto significa que cuando la luz se desplaza a través de un material denso, como, por ejemplo, el cristal e incide sobre otro material de menor densidad, como pueda ser el aire, con un pequeño ángulo oblicuo, la totalidad de la luz se refleja de nuevo hacia el interior del medio cuya densidad es superior. En la práctica, dicho fenómeno permite que se fabriquen fibras ópticas con un cristal denso en el centro de ellas y otro cristal de menor densidad a su alrededor. La luz se desplazará en línea recta por el interior de dichas fibras hasta el momento en que incida sobre su envoltura externa. Al hacerlo, siempre y cuando el ángulo sea lo suficientemente suave, se reflejará de nuevo hacia el centro de mayor densidad y seguirá desplazándose por el interior de la fibra incluso cuando esté doblada.

Hace un siglo, un físico británico llamado John Tyndall demostró dicho concepto por medio del agua que fluía de un depósito. En los años cincuenta, la American Optical Corporation logró construir fibras transmisoras de la luz sirviéndose de dos tipos de cristal. Estas primeras fibras eran capaces de transportar la luz a través de sinuosidades, pero sólo a una distancia que no excediese de unas decenas de metros.

La primera fibra de transmisión a larga distancia no apareció hasta 1970, y fue en los Corning Glass Works gracias a los esfuerzos de Robert Maurer, que a su vez se inspiró en las investigaciones sobre la capacidad del cristal ultrapuro para absorber la luz llevadas a cabo por Charles Kao y George Hockham, de los Standard Telecommunication Laboratories, subsidiaria británica de la International Telephone and Telegraph Corporation. En 1966, Kao y Hockham pronosticaron que las fibras de cristal serían capaces de transmitir luz a lo largo de más de un kilómetro. La práctica ha demostrado que su optimismo estaba perfectamente justificado.

Podemos forjarnos cierta idea del progreso de dicha tecnología echando una ojeada a algunas cifras. A mediados de los años sesenta, las mejores fibras que existían en el mercado absorbían aproximadamente el 90 por ciento de la luz que se introducía en ellas a una distancia inferior a los 10 metros. La distancia aumentó a unos 500 metros cuando Maurer descubrió las fibras de baja pérdida. En la actualidad, las mejores fibras que se producen en los laboratorios son capaces de transmitir luz a lo largo de más de 30 kilómetros antes de llegar a absorber el 90 por ciento de la luz introducida en ellas. Aclaremos que dichas distancias hacen

referencia a las longitudes de onda de menor absorción, que con las fibras disponibles en la actualidad sería de 1,3 a 1,5 micrómetros en la gama infrarroja, es decir, prácticamente el doble de la longitud de onda de la luz visible.

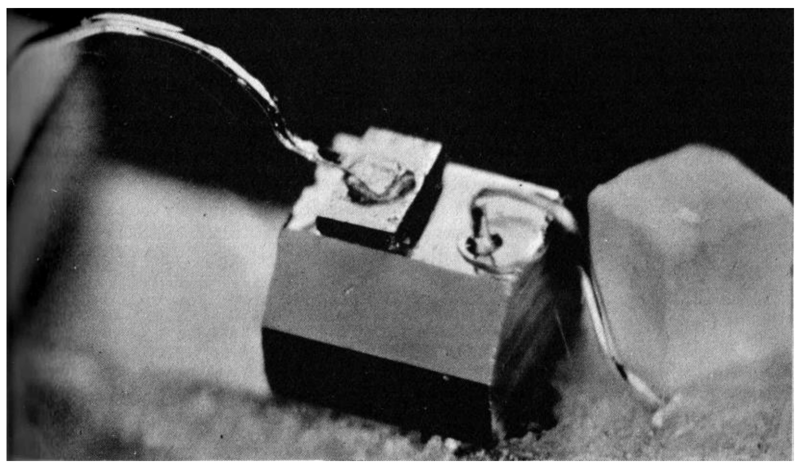
LOS PRINCIPIOS DE LA FIBRA ÓPTICA

Las comunicaciones por fibra óptica son en cierto modo análogas a las electrónicas, a excepción de que las señales se transmiten en forma de luz. Una fuente luminosa —o emisor— genera un haz de luz en el que se ha superpuesto una señal a través de un procedimiento denominado *modulación.* La señal luminosa es transmitida por una fibra óptica, que en la práctica está recubierta de forma que su aspecto sea similar al de un cable eléctrico de reducido diámetro. Al final de dicha fibra se encuentra un receptor que «recoge» o detecta la señal óptica, descifra la información contenida en ella (la *desmodula* de la luz) y amplifica la señal eléctrica resultante antes de que prosiga hacia la próxima etapa de la red de comunicaciones.

Se utilizan dos tipos de fuentes luminosas. El primero es un láser de semiconductor, consistente en un cristal cuyo tamaño no es superior al de un grano de sal, que contiene un minúsculo resonador capaz de emitir un haz reconocible como láser, a pesar de que diverge con mayor rapidez que el de otros modelos. El segundo es el *diodo emisor de luz* (denominado LED), que consiste en un cristal semiconductor semejante al láser de semiconductor, a excepción de que está desprovisto de resonador y emite un haz de luz más ancho. (La mayoría de las fuentes luminosas utilizadas para las fibras ópticas emiten, en realidad, luz infrarroja, y hablando con propiedad deberían denominarse IRED, es decir *diodos emisores de infrarrojos*; sin embargo preferimos ajustarnos a la costumbre de la inmensa mayoría de los ingenieros, que se limitan a utilizar el término LED.)

Cuando una corriente eléctrica que exceda cierto valor *umbral* determinado atraviesa el láser o el LED, la pastilla semiconductora emite luz. A partir del momento en que se excede dicha corriente umbral, la cantidad de luz es proporcional a la de corriente que atraviese el semiconductor; es decir, que si se aumenta la corriente, se incrementa la luz. Así

pues, las variaciones de la corriente se manifiestan en variaciones luminosas o modulaciones del haz de luz, de forma que dicho haz transmita la misma información que la señal eléctrica suministrada al láser o al LED. El haz de luz modulado se propaga entonces por la fibra hasta llegar a un receptor situado en el otro extremo de ella. En dicho receptor se encuentra un dispositivo semiconductor denominado *detector*, que produce una señal eléctrica proporcional a la cantidad de luz que recibe.



El pequeño rectángulo unido a un cable situado sobre el bloque es un lápiz de diodo. Este es el modelo que se utiliza para suministrar la luz en las comunicaciones por fibra óptica. El cubo blanco de la derecha es un grano de sal, lo que da una idea del tamaño de dichos láseres. Bell Labs

Desde el punto de vista del receptor no importa que la luz proceda de un láser o de un LED. En realidad, esa distinción sólo tiene importancia para el ingeniero que diseñe un sistema de fibra óptica. Por consiguiente, durante el resto del presente capítulo cambiaremos de enfoque para referirnos casi en exclusiva a las fibras ópticas, en lugar de hacerlo a los láseres propiamente dichos. Si bien los láseres no se utilizan en todos y cada uno de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, cabe destacar que han estimulado considerablemente el desarrollo de esta fascinante tecnología.

Lo más probable es que los láseres no dejen jamás de desempeñar algún papel en las comunicaciones por fibra óptica, pero es difícil prever su magnitud. Los LED resultan sumamente prácticos debido a que son menos caros y de mayor duración. La ventaja primordial de los láseres consiste en que emiten más luz y su modulación es más rápida. En estos momentos podría decirse, a guisa de información aproximada, que los láseres se utilizan para transmitir información rápida a lo largo de distancias superiores a 1 kilómetro, mientras que los LED se usan para transmisiones más lentas y distancias más reducidas. Es posible que la situación cambie con el progreso de la tecnología de los LED y de los láseres, pero el público en general jamás llegará a advertir la diferencia.

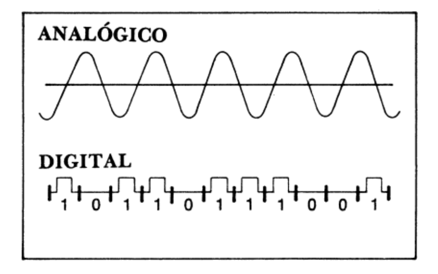
CONDENSACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Si la capacidad de las fibras ópticas fuese la misma que la de las comunicaciones electrónicas, su utilidad sería prácticamente nula. Sin embargo, es muy superior. Las fibras pueden solventar la aglomeración informativa existente gracias a que permiten la transmisión de una cantidad muy superior de información a la de los cables en un tiempo determinado. Una sola fibra, por ejemplo, puede transmitir el equivalente a más de mil conversaciones telefónicas.

Su elevada capacidad es crítica. Todo cuanto se comunica puede considerarse información, tanto si se trata de música, algún programa televisivo, una serie de puntos y rayas telegráficos, o datos digitales para un ordenador electrónico. La cantidad de información que pueda transmitirse en un tiempo determinado ha supuesto, desde siempre, una enorme limitación en el campo de las comunicaciones.

Es posible que las fibras ópticas aporten la solución a dicho problema. Las diferencias existentes entre los cables y las fibras ópticas son espectaculares. Las conversaciones telefónicas ordinarias son transmitidas analógicamente (véase el diagrama) con una *amplitud de banda* de 3.000 ciclos por segundo o Hertz. (La amplitud de banda media en Hertz [o ciclos por segundo] ofrece una indicación de la cantidad de información que puede transmitirse.) La amplitud de banda de la música de alta fidelidad es de unos 20.000 Hertz (o ciclos por segundo), y las de las señales de televisión (o T.V.) es de unos seis millones de ciclos por se-

gundo (o Hertz) (6 megaciclos). Por otra parte, se ha demostrado en pruebas realizadas en los laboratorios que las fibras ópticas son capaces de transmitir bandas de más de mil millones de Hertz.



COMUNICACIONES ANALÓGICAS Y DIGITALES

La información puede ser transmitida por uno de los dos sistemas siguientes: analógico *o* digital. *Una señal analógica es la que varía la amplitud de su onda continuamente, como en el sonido. Casi todos los aparatos electrónicos domésticos utilizados para la reproducción del sonido o de la televisión usan el sistema analógico.*

En transmisiones digitales se codifica la información en una serie de ceros y unos (véase el diagrama). Este sistema fue concebido inicialmente para transmitir únicamente información numérica, y es el que se utiliza en las calculadoras de bolsillo y en los ordenadores electrónicos.

Toda información puede ser traducida de un sistema a otro y viceversa. Dicha operación puede repetirse muchas veces y, en realidad, eso suele ocurrir en las redes telefónicas. La necesidad de conversión ha sido creada por el rápido progrese de la electrónica digital que reemplaza en muchos casos al sistema analógico, de mayor antigüedad, pero que debe ser compatible con los equipos existentes cuyo valor es de muchos miles de millones de dólares. Además de ofrecer una reproducción de mayor fidelidad (de ahí que se utilice en muchos estudios de grabación modernos) el sistema digital permite el procesado por computadora y los cambios de información, que es algo sumamente importante en el mundo de la telecomunicación.

Todas las cifras precedentes hacen referencia al sistema analógico que es el utilizado en la mayoría de las instalaciones de comunicaciones existentes. Aunque las fibras ópticas pueden operar sin dificultad alguna con señales analógicas, los láseres presentan un problema, puesto que distorsionan dichas señales. Por otra parte, la limitación de los LED consiste en no poder operar a la velocidad de los láseres, y por consiguiente no ser capaces de transmitir información con la misma rapidez.

Por fortuna existe un método para superar dicho problema, consistente en adoptar el sistema de trasmisión *digital,* en el cual la información se codifica en una serie de ceros y unos (véase el diagrama). Dichos *bits* de información pueden ser descifrados electrónicamente con el fin de generar una señal de tipo analógico como la de la música de alta fidelidad. Los láseres, LED, fibras y detectores pueden operar todos ellos con señales digitales sin dificultad alguna.

TRANSMISIONES A LARGA DISTANCIA

Las fibras ópticas ofrecen una segunda y enorme ventaja. No sólo son capaces de transmitir información con más rapidez que los cables, sino que también pueden hacerlo a mayor distancia. La clave que ha permitido la utilización de las fibras ópticas en el campo de las comunicaciones ha sido la espectacular reducción de las pérdidas experimentadas por la señal luminosa en el interior de la fibra, al aumentar enormemente la transparencia del cristal utilizado. Los investigadores no han cesado en su empeño, y en la actualidad las fibras capaces de transmitir a mayor distancia que los cables convencionales se fabrican en serie.

Para comprender la importancia de dicho descubrimiento, echemos una breve ojeada al sistema de comunicaciones a larga distancia. Se transmite una señal a lo largo de la distancia máxima que sea capaz de recorrer por cable, fibra óptica o cualquier otro medio transmisor, y entonces se amplifica la señal elevando su nivel antes de introducirla en una nueva línea de transmisión. El aparato utilizado para amplificar la señal se denomina *repetidor.*

La idea de un repetidor puede que parezca sencilla; sin embargo, en la práctica cabe la posibilidad de que cause innumerables problemas. Además de amplificar la señal de bajo nivel, el repetidor debe asegurarse de que la señal de salida de mayor potencia sea idéntica a la recibida por la línea de transmisión original. Por consiguiente, los repetidores son caros de fabricación y con frecuencia deben ser instalados al aire libre o en lugares de difícil acceso. Además, en el caso de que se estropeen, su reparación puede ser difícil y costosa cuando el acceso a ellos resulte dificultoso.

Debido a estos problemas, los operadores de sistemas de comunicaciones preferirían reducir el número de repetidores que utilizan, y las fibras ópticas podrían contribuir enormemente a que se materializasen sus deseos, sobre todo en el caso del sistema de comunicaciones de mayor difusión, es decir, el teléfono.

A las compañías telefónicas les interesan muchísimo las fibras ópticas para las líneas principales que transmiten gran cantidad de conversaciones simultáneas entre sus centrales. En los cables metálicos se ven obligados a instalar un repetidor cada 1,6 kilómetros más o menos, mientras que las fibras ópticas pueden operar fácilmente con un sólo repetidor cada seis kilómetros a lo sumo, lo que equivale a la distancia que separa las diversas centrales urbanas y suburbanas. El hecho es de gran importancia, puesto que una central telefónica constituye un lugar mucho más benigno para instalar un repetidor que debajo de una alcantarilla o en otros tantos sitios donde se colocan. Además, recientes mejoras desarrolladas en las fibras ópticas, pueden extender el espacio entre repetidores hasta 20 kilómetros.

FIBRAS BAJO EL AGUA

Otro uso todavía más espectacular de las fibras, si bien algo lejano, es su función como cable submarino. Aunque los circuitos satélite son convenientes, según un científico de los laboratorios Bell, llamado Peter Runge, el coste de una llamada telefónica vía satélite es tres veces superior al de las que se realizan por los cables transatlánticos. Además, el tiempo que tarda una señal en desplazarse hasta un satélite y regresar a la tierra es lo suficientemente prolongado para que se perciba, causando perturbaciones en las conversaciones telefónicas.

La empresa Bell se propone instalar un nuevo cable transatlántico hacia finales de la presente década, y según sus planes actuales se utilizarán fibras ópticas en lugar de cables metálicos. La cantidad de información que cada fibra es capaz de transmitir es muy superior (equivalente a unas 4 000 llamadas telefónicas) a la de un cable metálico convencional, y también puede ser mayor la distancia que separe los repetidores. Esto supone una enorme ventaja, puesto que un repetidor averiado en el fondo del océano crea un problema de gran magnitud. Para repararlo, puede ser

necesario izar varios kilómetros de cable, en cuyo proceso cabe la posibilidad de que el cable sufra desperfectos mecánicos, creando por consiguiente, nuevos problemas. Puesto que dichas operaciones son difíciles y costosas, los ingenieros se esfuerzan en construir repetidores de larga duración.

Los cables metálicos submarinos precisan un repetidor cada 9 kilómetros; no obstante, los ingenieros de los laboratorios Bell confían en que, al utilizar fibras ópticas, podrán aumentar el espacio entre repetidores hasta unos 35 kilómetros, lo que significaría utilizar una cuarta parte de los que se usan en la actualidad. La distancia entre los repetidores puede llegar a ser de 100 kilómetros con las mejores fibras fabricadas en los laboratorios, pero los ingenieros de la Bell no quieren que sus márgenes de seguridad sean excesivamente limitados.

Otra ventaja de las fibras ópticas consiste en que, gracias a su reducido tamaño, su instalación submarina sería mucho más fácil que la de los cables metálicos convencionales. No es de extrañar que Japón, Inglaterra, Francia y Estados Unidos perfeccionen dichas fibras para uso submarino en todos los confines del mundo.

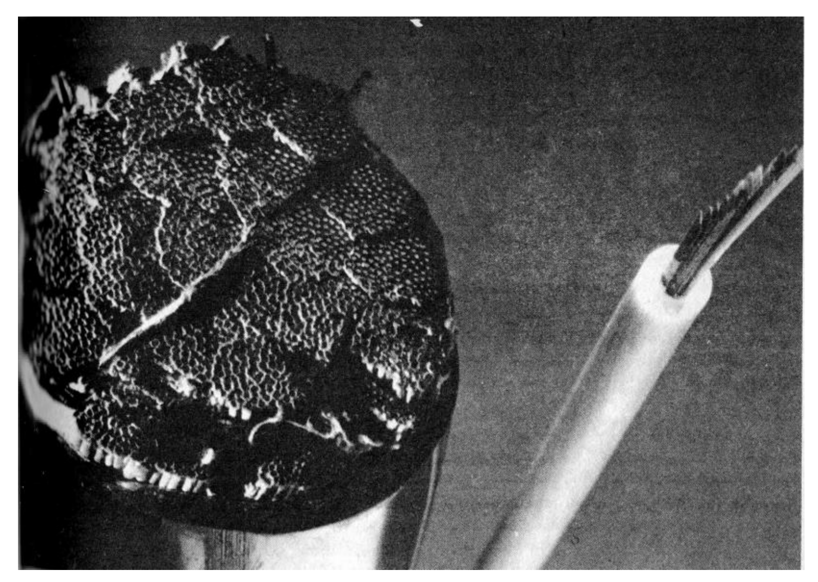
FIBRAS EN LOS AUTOMÓVILES

Las comunicaciones por fibra óptica ofrecen todavía otra gran ventaja. El cristal transmite luz en lugar de electricidad, y por consiguiente no produce chispas capaces de causar explosiones en las fábricas de productos químicos, refinerías petrolíferas u otros lugares donde existan productos volátiles. Asimismo, las fibras ópticas tampoco captan los «ruidos» procedentes de corrientes eléctricas cercanas que distorsionan la señal, como en el caso de los receptores de radio de onda media cuando se conecta a la red alguna maquinilla de afeitar o aspiradora.

Eliminar los efectos perniciosos de las corrientes eléctricas es, en la actualidad, una preocupación primordial de los ingenieros automovilísticos. El uso de microcomputadoras y otros componentes electrónicos se generaliza constantemente en los controles de los automóviles, y las tenues señales que activan los modernos semiconductores pueden ser distorsionadas con facilidad por el ruido eléctrico generado por otras

piezas, tales como las bujías. La General Motors considera la posibilidad de utilizar fibras ópticas para superar dicho problema.

Otras consideraciones que favorecen el uso de fibras ópticas son las propugnadas por Wesley A. Rogers, ex director de electroóptica avanzada del General Motors Technical Center, en Warren, Michigan. Rogers afirma que la red de cables en los coches actuales es pesada y de difícil mantenimiento. Además, puesto que prácticamente todos los controles están situados en el tablero o cerca de éste, la totalidad de los cables debe cruzar dicha zona, lo que supone un enorme problema para los mecánicos cuando deben llevar a cabo alguna reparación.



El de la izquierda es un cable telefónico convencional. El de la derecha es de fibra óptica, con una serie de fibras individuales unidas entre sí y protegidas por una funda. Este, a pesar de su mayor delgadez, es capaz de transmitir casi 50.000 conversaciones simultáneamente, más del triple que el cable convencional. Bell Labs

La solución propuesta por Rogers consiste en servirse de fibras ópticas para la transmisión de señales entre el tablero y otros lugares del automóvil. Los cables eléctricos irían directamente de la batería a los controles operados por fibra óptica, como, por ejemplo, el motor de las

ventanillas automáticas. La consecuencia sería una instalación mucho más sencilla y ligera que contribuiría al deseo de los fabricantes de automóviles de que los vehículos consuman menos combustible. La GM también confía en que las reparaciones de los sistemas de fibra óptica resultarían más fáciles que las de los cables convencionales, cuya dificultad es enorme aun en el mejor de los casos.

La tecnología óptica que la GM persigue es totalmente opuesta a la que los laboratorios Bell han perfeccionado para las telecomunicaciones. Mientras que estos últimos hablan de alineamientos de fibras con precisiones del orden de la milésima de milímetro, la GM piensa en sencillas instalaciones cuya alineación, así como su mantenimiento estén al alcance incluso de las mentes menos privilegiadas. Los laboratorios Bell se ocupan de perfeccionar una elaborada tecnología; sin embargo la GM intenta construir componentes baratos y duraderos como los LED, en lugar de láseres. Además, mientras que a los laboratorios Bell les interesa transmitir decenas de millones de *bits* de información por segundo, la GM se contenta con 1000 señales durante el mismo período de tiempo.

Las fibras se utilizan ya en ciertos casos para transmitir la luz de alguna bombilla hasta los intermitentes y otros indicadores del automóvil; sin embargo, el uso de fibras ópticas en los coches no se generalizará en un futuro próximo. Tampoco se utilizarán inicialmente las fibras para los sistemas vitales, como el limpiaparabrisas, sino que al principio se usarán en exclusiva para accesorios tales como las ventanillas automáticas, que no ponen en peligro la seguridad del vehículo en caso de que se estropeen. Puesto que los fabricantes de automóviles introducen sus innovaciones a partir de la cima, podemos esperar que los primeros vehículos que utilizarán fibras ópticas serán los Cadillacs, probablemente a partir de 1985.

LAS FIBRAS Y USTED

Es posible que el uso de fibras les parezca a los lectores algo sumamente remoto; sin embargo, ustedes se encuentran tan cerca de las comunicaciones por fibra óptica como de su televisor o su teléfono. Quienes presenciaron la transmisión de las olimpíadas de invierno de 1980 o han visto algún partido de fútbol retransmitido desde el estadio de Tampa

Bay han experimentado ya las comunicaciones por fibra óptica utilizadas para transmitir las señales televisivas.

La compañía telefónica de Nueva York montó una instalación provisional de fibras ópticas en Lake Placid, que enlazaba el estadio donde se celebraban las olimpíadas invernales con el centro de control utilizado por el equipo de televisión. El sistema óptico se utilizó exclusivamente hasta dicho centro de control, a partir del cual la transmisión a escala nacional se realizó por microondas y otros medios convencionales. Los resultados fueron excelentes, y la Pacific Telephone se propone utilizar fibras ópticas para transmitir los Juegos Olímpicos de verano que tendrán lugar en Los Angeles en 1984.

En Tampa, la General Telephone instaló un cable de fibras ópticas para transmitir señales televisivas desde el estadio de fútbol hasta otro lugar de Tampa que les permitiese conectar con la red de televisión nacional. Mientras que el circuito de Lake Placid fue instalado al aire libre y, por consiguiente, expuesto a los rigores invernales de Nueva York, el de Tampa ha sido montado en conductos subterráneos de carácter permanente. Sin embargo, a pesar de que el clima de Florida pueda parecer más benigno, la humedad debajo de las alcantarillas es permanente, lo cual suele deteriorar las instalaciones, y además acostumbra a proliferar en ellas una cierta fauna salvaje, entre la que se encuentra ocasionalmente algún caimán.

Las fibras ópticas se utilizan asimismo en otros lugares de la industria de la televisión, como por ejemplo en los estudios, debido a la alta calidad de las transmisiones que se realizan a través de ellas. También se usan para transmitir noticias y actos deportivos desde cámaras situadas en lugares remotos, debido a que son ligeras y de reducido tamaño. Además, las fibras ópticas permiten que se transmita a muy larga distancia.

La red de fibra óptica más extensa del mundo que se construye en la actualidad tendrá una longitud total de 3.200 kilómetros, y permitirá que la televisión llegue por cable a las cincuenta ciudades de mayor importancia de la provincia canadiense de Saskatchewan. (Las fibras ópticas resultan antieconómicas en la actualidad para conectar las casas particulares a la red de televisión por cable; sin embargo, es probable que la situación cambie cuando se ofrezca un mayor número de servicios de comunicación.)

También es posible que las llamadas telefónicas se realicen a través de fibras ópticas sin que el cliente necesariamente lo sepa. La empresa Bell y otras compañías telefónicas las utilizan para incrementar la capacidad de transmisión entre sus abigarradas centrales. El mayor de los sistemas que se construyen unirá Cambridge, Massachusetts, con Washington DC a lo largo del pasillo septentrional por donde circula la mayor concentración de tráfico telefónico del país. Dicho sistema será capaz de transmitir decenas de millares de conversaciones telefónicas en cualquier momento y lugar determinado. Y se encuentra en estado de planificación otro sistema similar que conectará Sacramento con Los Ángeles.

La instalación de fibras ópticas se lleva a cabo calladamente en docenas de lugares de la red telefónica nacional, tales como la zona rural del norte de Pennsylvania, Sugar Land, en Texas, Chicago, Las Vegas, el populoso barrio de Manhattan, y a lo largo del puente de Golden Gate. Otro tanto ocurre en Argentina, Canadá, Polonia, Italia, Japón, Inglaterra, Francia y otros países del globo.

Dichas instalaciones de fibras ópticas causarán un impacto indirecto, en primer lugar reduciendo los costes y mejorando los servicios. Pero, además, suponen ya un sereno anticipo del mundo del futuro.

HACIA LA ERA DE LA FIBRA ÓPTICA

Al ritmo que avanza la tecnología de la fibra óptica y su reducción de coste, lo más probable es que dentro de diez o veinte años llegue a todos los hogares con su capacidad de comunicación plenamente desarrollada.

La era de la fibra permitirá que se materialicen los servicios de comunicación previstos hace más de una década, además de otros en los que no se había ni remotamente soñado en aquella época.

En un alarde de locuacidad, algunos escritores habían hablado de las «sociedades intercomunicadas» como si se tratara de algo perteneciente a un futuro remoto. En realidad, nuestra sociedad está dotada ya de redes telefónicas nacionales conectadas entre sí que nos permiten comunicarnos con los habitantes de múltiples lugares del globo. Los mismos servicios son capaces de transmitir datos codificados en forma digital entre

computadoras, o información que permite la reconstrucción de un documento original en pocos minutos.

Existen también zonas de Estados Unidos donde la televisión se transmite por cable.

Existe, sin embargo, una importante diferencia entre el sistema utilizado por la televisión y el del teléfono. La red telefónica permite que dos individuos hablen entre sí sin intervención de terceros (siempre y cuando el equipo funcione correctamente), mientras que en el caso de la televisión por cable el cliente selecciona desde su propia casa uno de los numerosos canales transmitidos desde la central.

El concepto clave de una sociedad conectada por fibra consiste en la creación de una red de video similar al actual sistema telefónico y que permita que los abonados se comuniquen visualmente entre sí o, lo que es todavía más importante, que puedan ponerse en contacto con servicios que faciliten información especializada. Esto significaría que desde cualquier punto de la red se tendría acceso a lecciones visuales de idiomas, informes sobre la bolsa, películas, así como prácticamente todo lo que pueda aparecer en una pantalla de televisión y que el servicio suministrador tenga en su biblioteca o en las memorias de su computadora.

El departamento de la vivienda y del desarrollo urbano de los Estados Unidos (HUD) quiso poner a prueba este modelo de ciudades enlazadas hacia 1970, sirviéndose de cable coaxial. Los equipos eran relativamente rudimentarios, la posibilidad de elección entre empresas suministradoras de información, muy limitada, y el coste resultaba elevado. A las limitaciones tecnológicas se unieron los problemas políticos que aquejaron el programa de planificación urbana de la Administración del presidente Nixon.

El primero en sugerir que se utilizasen fibras ópticas para el proyecto en cuestión fue John Fulenwider, que en aquella época trabajaba en los laboratorios de la GTE y hoy lo hace en los de Arthur D. Little Inc. Al cancelar dicho programa de planificación en el año 1972, su sugerencia fue totalmente ignorada en Estados Unidos; sin embargo, no ocurrió otro tanto en ciertos lugares.

LA CIUDAD JAPONESA DE LA FIBRA

Durante la última década, Japón ha progresado enormemente en el campo de la electrónica comercial y sobre todo en los productos de consumo. Tal ha sido la magnitud de su progreso que ha llegado a preocupar a las empresas electrónicas estadounidenses. Desde 1975, los japoneses se han dedicado a perfeccionar con el mismo ímpetu las fibras ópticas, convirtiéndose en los líderes mundiales en muchas áreas de las tecnologías de la fibra óptica y de los láseres de semiconductores. El 18 de julio de 1978, los japoneses fueron también los primeros en exhibir un sistema de comunicaciones por fibra óptica con una gran amplitud de banda dirigido a las casas particulares de Higashi Ikoma. En el momento de escribir este libro no habían concluido todavía los experimentos.

El sistema se denomina HI-OVIS, que corresponde a las iniciales inglesas de «Sistema de información visual óptico altamente interactivo», y está conectado a 158 viviendas. No se ha dado a conocer su coste exacto, pero según opiniones bien informadas se calcula que en 1980 era de unos 25 a 40 millones de dólares, procedentes en su mayoría del poderoso Ministerio japonés de comercio internacional e industria.

Entre otros fines, el proyecto HI-OVIS se propone evaluar la tecnología de la fibra óptica y contribuir a que Japón perfeccione dicha industria. Sin embargo, la parte más interesante del experimento es la que hace referencia a las cuatro metas primordiales de orden *social* del programa:

a) La creación de una nueva comunidad de gente relacionada entre sí a través del HI-OVIS, es decir, una especie de barrio-video.

b) Facilitar programas educativos a domicilio.

c) Perfeccionar una «sociedad segura y protegida» en la que sus componentes se sientan estimulados a ayudarse mutuamente, facilitar asistencia médica y llamar a la policía o al servicio de bomberos a través de su red de comunicaciones.

d) Lograr que los miembros de dicha sociedad seleccionen voluntariamente la fuente de información que les interese en lugar de comportarse como pasivos televidentes.

El elemento central de dicho experimento social es un canal de televisión interactivo que técnicamente se transmite desde unos estudios situados en la oficina central del HI-OVIS. Sin embargo, los abonados disponen de cámaras de televisión y micrófonos en sus propios domicilios que

les permiten participar en los programas, al igual que se utilizan los teléfonos para tomar parte en un programa de radio. Los ingenieros de los estudios pueden seleccionar una señal de los propios estudios u otra procedente del domicilio de algún abonado para transmitirla a través de la red.

Los programas del canal interactivo están diseñados para estimular a los abonados a que participen en ellos. En algunos casos se basan en discusiones políticas, y en otros en experiencias compartidas. Un ejemplo de ello son los programas culinarios, en los que los televidentes, desde su propia cocina, pueden preparar sus recetas predilectas ante un extenso público.

El HI-OVIS cumple también la función de un sistema de televisión por cable a través del cual se transmiten programas de estaciones lejanas hasta el domicilio de los abonados. Asimismo éstos tienen acceso, a través de sus controles, a una pequeña biblioteca visual. Entre el material de dicha biblioteca originalmente figuraban numerosos programas infantiles, pero fue tal el entusiasmo de los niños que, además de monopolizar el servicio agotaron numerosas cintas de video después de efectuar con ellas más de 500 proyecciones. El servicio ofrece también información actualizada, como horarios de trenes y de aviones.

Parece que a los japoneses les satisfacen los resultados obtenidos hasta estos momentos. «El HI-OVIS ha pasado a formar parte de la vida de los abonados», ha concluido un informe preliminar. La próxima etapa consistiría en expansionar el sistema creando el HI-OVIS II, que llegaría a varios miles de hogares y costaría probablemente más de 100 millones de dólares. En el caso de que se apruebe la decisión, el HI-OVIS II podría entrar en servicio en 1985.

LAS GRANJAS CON FIBRAS AL ESTILO CANADIENSE

Una prueba menos ambiciosa y mucho más barata de los servicios que las fibras ópticas pueden facilitar a domicilio comenzó en la zona rural de Manitoba en septiembre de 1981. Dicho sistema alcanzará unas 150 casas, de las cuales una tercera parte está situada en el pueblo de Elie, otra tercera parte en el de St. Eustache, y el resto son granjas esparcidas entre ambos. El proyecto forma parte del plan canadiense destinado

a dotar las zonas rurales de servicios de telecomunicaciones iguales o mejores que los existentes en las ciudades, según las declaraciones de Brian McCallum, quien ha contribuido a organizar dicha prueba. El interés de Canadá por mejorar la calidad de la vida rural refleja la importancia de la agricultura en la economía del país.

El coste de dicho proyecto es de unos 6,3 millones de dólares, es decir, aproximadamente una quinta parte del HI-OVIS, y sin embargo los servicios son similares, a excepción del canal interactivo. Los abonados de Manitoba pueden recibir dos canales simultáneamente, a elegir entre nueve, mientras que los del proyecto HI-OVIS sólo pueden sintonizar un canal en un momento dado (lo que significa que todos los receptores de televisión de los que dispongan en una casa determinada deberán estar sintonizados necesariamente al mismo canal). Además, los abonados canadienses pueden elegir entre siete programas musicales estereofónicos que no existen en el HI-OVIS. Otra ventaja consiste en que, en el sistema canadiense, las fibras ópticas se utilizan también para el servicio telefónico, gracias a lo cual algunos abonados de Manitoba dispondrán por primera vez de teléfonos privados. En realidad, numerosos residentes de la zona se han visto obligados a compartir líneas telefónicas, y sólo últimamente se ha reducido a cuatro el número de usuarios por línea. En el sistema de Manitoba existe también un canal que permite a los abonados comunicarse con una computadora, pero sin acceso a ninguna biblioteca visual.

LA VISIÓN FRANCESA DEL FUTURO

En el momento de escribir estas líneas, la visión más ambiciosa con relación al uso futuro de las fibras ópticas es la francesa. La dirección de telecomunicaciones del país galo, responsable de la red nacional, ha decidido invertir 100 millones de dólares con el fin de instalar un sistema de fibra óptica que conecte 4.500 domicilios en la ciudad veraniega de Biarritz. Según sus actuales planes, 1.500 casas inaugurarán el servicio a principios de 1983. Dicho sistema forma parte de los esfuerzos que realizan los franceses para incrementar el desarrollo tecnológico en su país.

El proyecto de Biarritz es el primero en el que se incluye un servicio de videoteléfono. La idea es parecida a la del sistema de teléfono visual

de la Bell que no llegó a difundirse en Estados Unidos. Sin embargo, cabe la posibilidad de que el sistema francés tenga mejor suerte, puesto que su tecnología es más avanzada, debido a que se sirve de pantallas de televisión europeas de alta definición con una cantidad de líneas que supera aproximadamente en un 20 por ciento a las utilizadas en Estados Unidos, cuyas imágenes son de muy baja resolución. Debido a que se supone que el coste de las llamadas videotelefónicas no será muy superior al de las llamadas convencionales, los planificadores del sistema de Biarritz confían en evitar otro factor que contribuyó al escaso éxito del teléfono visual norteamericano: su elevado coste.

A todos los abonados de Biarritz se les entregará un receptor de televisión en color y una cámara en blanco y negro. A pesar de que el videoteléfono podría funcionar con cámaras de color, no existe ningún modelo fabricado en Francia capaz de adaptarse a las variaciones luminosas de diferentes casas, y en lugar de importar modelos extranjeros, el Gobierno francés ha optado por suministrar cámaras en blanco y negro de fabricación nacional. Sin embargo, los usuarios podrán utilizar cámaras en color si lo desean.

Además del videoteléfono, los abonados podrán elegir entre cinco Canales de televisión en color, tres procedentes de Francia y dos de España (puesto que Biarritz se encuentra cerca de la frontera española). También se ofrecerán cintas y transmisiones locales hasta un total no inferior a quince canales. Según Alain Bernard, ingeniero director del proyecto, cabe la posibilidad de que se utilice un canal para monitorizar permanentemente el estado de la mar en las playas de la zona, y los usuarios podrán elegir entre cinco canales de música estereofónica.

LAS FIBRAS Y EL FUTURO

HI-OVIS, Elie y Biarritz son apenas unos meros simulacros de las posibilidades que ofrecen los sistemas de fibra óptica de gran amplitud de banda. Gracias al perfeccionamiento de la tecnología de la fibra óptica y de las computadoras, a finales del presente siglo el mundo entero podrá estar entrelazado por una sola red integrada de comunicaciones y suministro de información. Las primeras fases de dicho sistema podrían entrar en funcionamiento antes de 1990 en los países más avanzados, como

Francia, Japón y Canadá. (A pesar de que la Bell y otras compañías telefónicas están instalando fibras ópticas, en las redes de Estados Unidos es imposible, debido a la política gubernamental actual, que una sola organización se dedique al impulso del sistema de comunicaciones de gran amplitud de banda a nivel nacional, y por consiguiente refleja un enorme retraso con relación a otros países.)

Quedan todavía por superar algunas barreras tecnológicas, en especial la carencia de métodos prácticos para conectar señales ópticas. Sin embargo, dado el asombroso progreso de la investigación en el campo de las fibras ópticas es de suponer que se superarán en un futuro próximo. La primera fase del HI-OVIS había quedado prácticamente anticuada a partir del momento de su entrada en servicio. Brian B. McCallum, que ha colaborado en la planificación del sistema de Elie, cree que, durante la primera mitad de esta década, la mayoría de los sistemas quedarán anticuados en el tiempo que transcurra entre la planificación y su conversión en red operacional.

El futuro de la telecomunicación escapa a los límites de este libro. No obstante, concluiremos el presente capítulo con algunos ejemplos de las maravillas que la integración de las tecnologías de la fibra óptica y de las computadoras nos aportarán en el futuro:

a) *Estaciones de trabajo domésticas* con terminal de video y cuadro de mandos. Gracias a este sistema se podrá trabajar sin salir de casa, comunicarse por videoteléfono con los colegas que se encuentren junto a sus respectivas estaciones y servirse de la información computarizada que facilite la empresa y otras organizaciones. Las estaciones de trabajo probablemente incluirán una cámara de televisión y un emisor-receptor capaz de reproducir documentos transmitidos por la red de comunicaciones. Casi con toda seguridad, dichas estaciones serán capaces de hablar y tal vez comprenderán también el lenguaje hablado.

b) *Obtención de datos* de las bibliotecas del mundo entero. En dichas bibliotecas no sólo habrá textos impresos, sino también material sonoro y visual. En el caso, por ejemplo, de que a alguien le apeteciese ver la película *Lo que el viento se llevó*, podría solicitar que alguna biblioteca se la transmitiese (previo pago de la tarifa correspondiente). Sin embargo, de momento no cabe el peligro de que desaparezcan los libros, por lo menos hasta que alguien descubra algún sistema visual más manejable y

de más fácil lectura que el tubo de rayos catódicos utilizado en la actualidad.

Servicios domésticos de control, tales como alarmas de incendios o antirrobo, termostatos automáticos, contadores, etc.

d) *Finanzas y compras* que permitan realizar transacciones bancarias o adquirir provisiones sin moverse de su propia casa.

e) *Traducción simultánea* de una conversación. Podría hablarse, por ejemplo, en inglés desde una estación de trabajo que reconocería las palabras y las transmitiría a un traductor electrónico. Entonces el ordenador traduciría la conversación a otro idioma —quizá japonés— y la transmitiría a otra estación de trabajo en cualquier lugar del mundo, donde una voz sintetizada repetiría la conversación en japonés. El sistema en cuestión no sería de un tamaño tan reducido como los traductores electrónicos portátiles que los autores de ciencia-ficción han descrito en sus obras para solucionar los problemas lingüísticos entre los personajes de sus novelas. Sus traducciones tampoco serán particularmente elegantes. Sin embargo, es probable que el sistema llegue a funcionar, siempre y cuando se solucionen algunos peliagudos problemas relacionados con el reconocimiento del lenguaje hablado, acaso programando la computadora para que reconozca la voz de una sola persona.

7. LOS RAYOS DE LA MUERTE... Y OTRAS ARMAS

Sin duda han oído hablar de lo siguiente:

a) Que los rusos, por medio de un enorme láser instalado sobre una montaña, han derribado un satélite espía norteamericano.

b) Que el ejército de Estados Unidos, en pruebas realizadas ya en 1976, logró derribar proyectiles de control remoto y que las fuerzas aéreas norteamericanas disponen de un láser gigantesco que ocupa un avión entero para ser utilizado en ataques aéreos convencionales.

c) Que tanto los rusos como los norteamericanos se proponen instalar estaciones espaciales con armamento láser y que la tercera gran guerra tendrá lugar en el espacio al estilo de *La guerra de las galaxias.*

d) Que Rusia está mucho más adelantada que Estados Unidos en el campo de los láseres bélicos y que es, por consiguiente, necesario «acortar la distancia».

Algo de cierto hay en todo ello, pero es posible que también hayan llegado a sus oídos los siguientes rumores:

a) Que dos respetables científicos, uno del Instituto de tecnología de Massachusetts y otro de la universidad de Carnegie-Mellon, consideran que la idea de los láseres como armas espaciales es una verdadera tontería y afirman que dichos artefactos no lograrán jamás emitir suficiente energía para destruir sus objetivos.

b) Que algunos observadores militares en Washington opinan que los informes de las proezas de los rusos son sencillamente falsos y que su objeto es el de convencer al pueblo y al Congreso de la necesidad de gastar miles de millones de dólares en programas de perfeccionamiento de las armas láser en Estados Unidos.

c) Que uno de los inventores del láser estima que los láseres bélicos están alcanzando unas dimensiones tan gigantescas que su única utilidad consistirá, por último, en arrojar el aparato sobre el enemigo.

Hay también *cierta* verdad en dichas afirmaciones. El tema de los láseres bélicos es sumamente complicado. ¿Son los láseres capaces de destruir un proyectil en pleno vuelo o de librar una guerra en el espacio? Todavía no se sabe. Los que en un sentido o en otro han querido dar respuestas definitivas, en general se han limitado a hablar de acuerdo con

sus convicciones. Sin embargo, de lo que no cabe duda es de que los láseres bélicos existen y de que tanto Estados Unidos como la Unión Soviética procuran mejorar su calidad y su potencia. A continuación les relataremos la historia de las pruebas realizadas y de los obstáculos que se interponen en su camino.

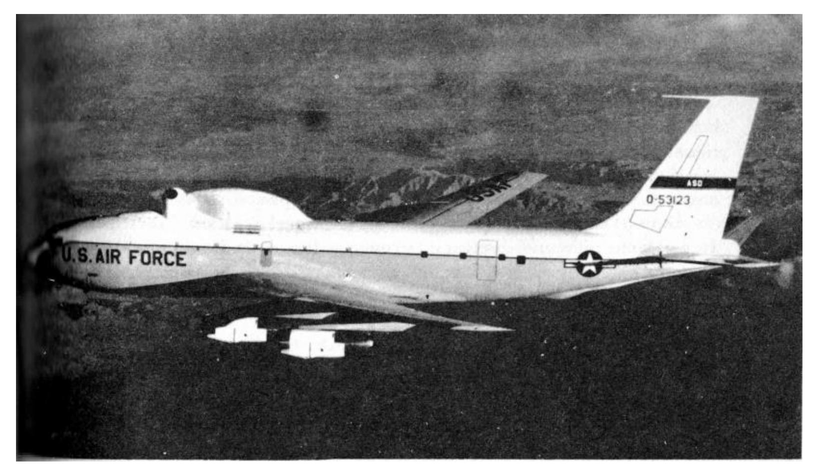
ARMA DEL FUTURO

A los militares les entusiasman los láseres, y no es sorprendente que así sea. Los láseres de baja potencia han sido ya utilizados para mejorar la precisión con que ciertas armas pueden alcanzar sus objetivos. En realidad, el Departamento de defensa estadounidense declaró que «los láseres señalizadores de objetivos constituyen *la inversión que mayor éxito ha obtenido* durante las últimas décadas». Estas fueron las palabras de George Gamota, ayudante de investigación del subsecretario de defensa encargado de la investigación y la ingeniería, ante la Subcomisión de ciencias, tecnología y espacio del Senado a finales de 1979.

El programa militar de los años ochenta se concentra en el perfeccionamiento de láseres de alta potencia, no ya para dirigir los proyectiles hasta sus objetivos, sino en calidad de armas. En el caso de que se logre perfeccionar los láseres de alta potencia —y no existe garantía alguna de que así sea—, cambiarían radicalmente las normas de la estrategia defensiva. Las armas láser podrían constituir un sistema de defensa verdaderamente eficaz ante un ataque nuclear con misiles intercontinentales. Si bien a la larga tal perspectiva parece halagüeña, algunos observadores temen que a corto plazo podría alterar el frágil equilibrio basado en la «destrucción mutua asegurada (DMA)» que emana de la convicción de que, con la tecnología existente en la actualidad, Estados Unidos y la Unión Soviética se destruirían inevitablemente si se desencadenase una guerra nuclear a gran escala. Dicho de otro modo, con la existencia de un sistema de defensa láser la posibilidad de una guerra nuclear sería «pensable».

El Departamento de defensa de Estados Unidos (DOD) ha gastado ya mil quinientos millones de dólares en el perfeccionamiento de láseres de alta potencia, y no ha cejado todavía en su empeño. También *es cierto* que en Norteamérica se han logrado derribar proyectiles, simples y tele-

dirigidos, con la ayuda de láseres de alta potencia. Existe, además, otro programa paralelo de menor importancia que estudia la posibilidad de perfeccionar armas capaces de inutilizar sus objetivos con haces de partículas cargadas tales como electrones y/o *iones* (es decir, átomos de los que se han eliminado uno o más electrones). Ambos proyectos forman parte de un programa destinado al perfeccionamiento de armas de «energía dirigida», pero sólo nos ocuparemos del que hace referencia a los láseres.



El avión que vemos en la fotografía es, en realidad, un láser con alas, el AIRBORNE LASER LABORATORY. Es del tipo de dióxido de carbono, de alta potencia; con sus accesorios, ocupa prácticamente la totalidad del espacio interior de este avión KC-135 (la versión militar del Boeing 707). Department of the Air Force (EE. UU.)

La Unión Soviética tiene también su propio programa, pero no se conoce exactamente su nivel de desarrollo. Se les suele atribuir el hecho de haber alcanzado con la ayuda de un láser un satélite espía norteamericano que sobrevolaba su territorio, pero al parecer los rumores según los cuales el satélite había quedado inutilizado son falsos. Es posible que el vehículo espacial perdiese temporalmente su capacidad de detección; sin embargo, los daños no fueron permanentes. Existen también informes según los cuales, gracias al uso de un láser ruso en la guerra entre China y Vietnam, numerosos soldados chinos perdieron la vista, lo cual inci-

dentalmente constituiría la única forma práctica de utilizar el láser en calidad de arma directa contra los seres humanos. En todo caso, el programa soviético parece ser de mayor envergadura que el norteamericano y, al contrario de lo que ocurre en Estados Unidos, existen indicios de que los rusos intentan desarrollar sistemas específicos de armas láser, que es algo que en Norteamérica se considera prematuro. Hasta ahora, los militares estadounidenses se han limitado a investigar las posibilidades prácticas de las armas láser, en lugar de comprometerse a construir productos utilizables.

En todo caso, es improbable que los láseres aparezcan en el campo de batalla en un futuro inmediato. Lo que ocurre en una demostración experimental es totalmente diferente de lo que sucede en plena batalla, como han podido comprobarlo tanto los ingenieros como los soldados con otras armas nuevas. «No conozco a nadie que crea en la posibilidad de construir un prototipo experimental (láser)», declaró el coronel Frederick S. Holmes Jr., ayudante militar del director de tecnología de energía dirigida del Pentágono a finales de 1980. «No hemos logrado demostrar el alcance, la precisión, ni la facilidad de mantenimiento necesarios para su uso militar.»

DE QUÉ SERÍA CAPAZ UN LÁSER BÉLICO

A pesar de que es posible que los láseres bélicos se conviertan en realidad en el plazo de dos décadas a lo sumo, la visión que de ellos tenemos está todavía empañada por los escritos de varias generaciones de autores de ciencia-ficción. En muchos sentidos, una de las primeras versiones —la del rayo calorífico marciano de H.G. Wells en *La guerra de los mundos*, que hemos mencionado en las frases iniciales de este libro— es la que con mayor y escalofriante precisión se ajusta a la realidad. «La invisible e inevitable espada calorífica» que destruye sus objetivos calentándolos hasta que se incendian, escribió Wells. Su visión era la de un intenso rayo de luz infrarroja que correspondía a la invisible radiación electromagnética que emana de los objetos calientes. Todos los láseres bélicos que han alcanzado un mayor nivel de perfeccionamiento emiten rayos infrarrojos, y una de las formas en que destruyen sus objetivos es

calentándolos lo suficiente para dañar sus componentes vitales (que, como explicaremos a continuación, no significa incendiarlos).

El término *destrucción* tal vez sea confuso, en cuanto que induce a pensar en volatilización o explosión, sin que esto sea necesariamente lo que ocurra. Un satélite espía, por ejemplo, queda inutilizado cuando pierde sus «ojos» electrónicos, es decir, sus cámaras o equipos de detección. Si se logran inutilizar estos «ojos» con un rayo láser cuya intensidad sea excesiva para la sensibilidad de las cámaras, el satélite en cuestión estará funcionalmente muerto a pesar de que siga en su órbita. Como ya hemos mencionado con anterioridad, la capacidad de los láseres de alta potencia para producir la ceguera de los soldados representa también su única aplicación racional en el campo de batalla. Al igual que en el caso de los satélites espías, la parte de los seres humanos más vulnerable al láser son los ojos. Los láseres utilizados con este fin reciben, en algunos casos, el repugnante calificativo de «descorchador ocular».

Es posible que dichas aplicaciones parezcan espectaculares; sin embargo, son de fácil consecución para los láseres de alta potencia. Los ojos, tanto si son humanos como electrónicos, están diseñados para ser sensibles a la luz. Su finalidad es detectar señales tenues, y no es difícil que reciban una sobrecarga. Un rayo láser capaz de dañar la vista acaso ni siquiera sea detectable sobre la piel, y un rayo lo suficientemente potente para inutilizar las cámaras es probable que no infrinja marca alguna sobre el metal circundante. No olvidemos que incluso el sol puede causar la ceguera parcial si lo observamos directamente.

Es preciso que el láser sea mucho más potente para que perjudique el metal u otras partes duras del objetivo. Sin embargo, además de la potencia es preciso considerar otros elementos. La forma en que la energía del haz de luz láser sea transferida o *acoplada* al objetivo es también importante.

La primera parte del proceso consiste en un simple calentamiento. Todos los objetivos absorben parte de la energía del láser y reflejan la restante. La energía absorbida sirve para calentar el objetivo y, a medida que aumenta su temperatura, generalmente aumenta también la cantidad absorbida de la energía incidente del láser. Si se dispara sobre el objetivo con la suficiente potencia y duración, su superficie empezará a fundirse y, posteriormente, a evaporarse, produciendo una nube de gas ionizado llamado plasma. Si las condiciones son idóneas, el haz láser continuará

transfiriendo energía al objetivo a través del plasma y lo perforará gradualmente. «Gradualmente» es un término relativo, puesto que todo el proceso dura unos escasos segundos si la potencia del láser resulta lo suficientemente elevada.

Sin embargo, el simple calentamiento no constituye la forma más eficaz de utilizar el láser. Si se emite una serie de pulsaciones de alta potencia en lugar de un haz continuo, el láser puede causar desperfectos mecánicos además de térmicos (caloríficos). Cada pulsación evapora una pequeña parte del material de la superficie, y la evaporación genera a su vez una onda de choque que debilita el material, fundamentalmente al golpearlo. La forma más eficaz consiste en lanzar una ráfaga de impulsos rápidos que calienten y golpeen simultáneamente el material, puesto que, al aumentar su temperatura, la mayoría de los metales experimentan una disminución de su capacidad de resistencia a los impactos.

La combinación de daños térmicos y mecánicos es importante, debido a que la mayoría de los objetivos militares están fabricados con planchas de aluminio y el brillo de su superficie los convierte en un difícil blanco. Incluso sin haber recibido tratamiento alguno, el aluminio refleja el 90 por ciento de la luz incidente procedente de un láser de dióxido de carbono, y si ha sido cuidadosamente pulido, su capacidad de reflexión es todavía mayor. Si nos propusiésemos taladrar una fina plancha de aluminio con un láser cuya potencia oscilase entre 100.000 y 1 millón de vatios por centímetro cuadrado, se requerirían unas 30 pulsaciones para fundir el metal. Para quebrar la misma plancha con fuerza puramente mecánica (es decir, permitiendo que se enfriase el aluminio entre una y otra pulsación), se necesitarían 10 pulsaciones. Sin embargo, si utilizamos la fuerza termomecánica —es decir, una combinación de ambas— bastarán con 4 o 5 pulsaciones.

El propósito consiste en dañar una porción crítica del objetivo. Si se perfora el depósito de gasolina, es posible que el objetivo se incendie, estalle, o como mínimo pierda su potencia. Después de atravesar la pared exterior de un proyectil o de un avión, cabe la posibilidad de que se dañen algunos componentes internos fundamentales, tales como los circuitos electrónicos, que pueden ser inutilizados con temperaturas que no afectarían a las planchas de aluminio. Una carga nuclear podría ser inutilizada destruyendo algunos de sus componentes críticos. En cualquier caso, el objetivo sería inutilizado al impedirle que llevase a cabo su mi-

sión, para lo cual no sería necesario destruirlo totalmente. Sin duda alguna, esto plantea un sutil problema relacionado con el uso bélico de los láseres: ¿cómo se sabe cuándo se ha destruido un objetivo sin que haya estallado?

En teoría, con un láser se podría volatilizar enteramente el objetivo, pero ¿por qué molestarse? Para perforarlo, lo único que se requiere es concentrar toda la energía del láser en un punto determinado; sin embargo, para volatilizarlo sería preciso utilizar muchísima más energía, y se tardará todavía mucho tiempo en disponer de láseres con suficiente potencia.

Por supuesto, los proyectiles y los aviones enemigos pueden también defenderse del láser, y lo logran utilizando espejos. A pesar de que no existe ninguna superficie que sea perfectamente reflectora, es posible cubrir los objetivos con materiales que reflejen gran parte de la luz incidente del láser. Otro sistema consiste en minimizar la cantidad de energía absorbida del haz controlando la forma en que se volatiliza el material del objetivo. Los investigadores militares estudian, entre otras, dichas contramedidas, además de preocuparse de las contra-contramedidas destinadas a superar las contramedidas del contrincante, etc., etc.

LAS PISTOLAS LUMINOSAS Y DEMÁS MITOS

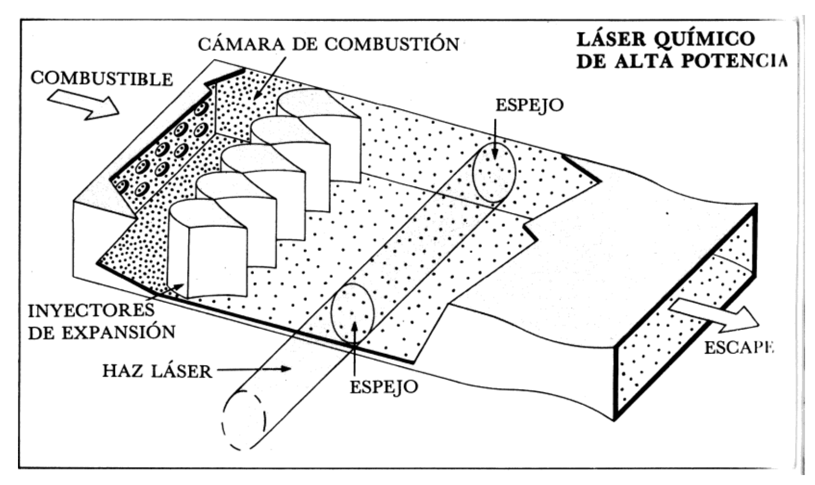
Desde la época en que H.G Wells escribió La *guerra de los mundos*, varias generaciones de escritores de ciencia-ficción han difundido imágenes de armamento mucho menos plausibles. Entre los predilectos se encuentra el rayo de la muerte, que cumple su funesto cometido al entrar en contacto con cualquier parte del cuerpo; la pistola lanzarrayos, que puede ajustarse para que sus efectos oscilen entre una parálisis temporal y la volatilización instantánea; el rayo desintegrador, que hace que un objetivo desaparezca o se convierta en un montoncito de polvo por el simple hecho de entrar en contacto con cualquier parte de él; y el rayo paralizador, la más humana de las armas de ciencia-ficción, que se limita a aturdir a la víctima. Todas las armas citadas son lo suficientemente ligeras para que el héroe pueda manipularlas fácilmente con una sola mano. Sin embargo, en realidad ninguna de ellas se parece en lo más mínimo a un auténtico láser, que no sería capaz de infligir ninguno de los

efectos descritos, a no ser que el objetivo fuese del tamaño de un mosquito.

Quizá los rayos X puedan parecer un posible rayo de la muerte, pero en la práctica presentan enormes problemas. Se necesita *muchísima* energía para activar un láser de rayos X; en el único experimento conocido se utilizó una explosión nuclear, que evidentemente no podría tener lugar en un aparato portátil. Además, los rayos X no matan con rapidez, y lo que los militares desean en el campo de batalla son muertes instantáneas. ¡Algo decepcionante como rayo de la muerte!

¿Qué hay entonces de las pistolas lanzarrayos inventadas por los novelistas a partir del momento en que oyeron hablar del descubrimiento del láser en los años sesenta? Entre los numerosos problemas existentes, quizá el principal consiste en el poco rendimiento de los láseres, debido a lo cual más de la mitad de la energía utilizada se limita a calentar el propio láser. Además, tampoco es posible generar la suficiente cantidad de energía con un láser portátil para que su poder destructivo sea comparable con el de una bala. La capacidad destructiva de una bala depende en mayor medida de su *ímpetu*, que de la cantidad de energía de que pueda ser portadora. Es precisamente el ímpetu lo que permite que atraviese y destruya los tejidos orgánicos; sin embargo, los fotones no están dotados del ímpetu necesario para causar efectos semejantes. Para que un láser destruya, es necesario que logre quemar algún órgano crítico.

Con el fin de evaluarla capacidad potencial de un láser portátil, hemos realizado algunos rudimentarios cálculos. Uno de los láseres más potentes del mundo es el láser de fusión de Antares, en el laboratorio nacional de Los Alamos, capaz de producir unos 50 julios de energía por litro de gas. Suponiendo que un láser portátil fuese capaz de contener un litro de gas, generar 50 julios en una sola pulsación y concentrar su rayo sobre un centímetro cuadrado de la piel desnuda de un enemigo, podría, como máximo, llegar a producirle alguna quemadura. Lo más probable es que un láser portátil no llegase siquiera a atravesar la ropa y que, por otra parte, produjese suficiente calor para quemar las manos del operador. Con toda certeza no lograría paralizar a un soldado, ni mucho menos a un miembro de un comando moderno debidamente equipado. Para provocar una quemadura que lograse atravesar un cuerpo humano, se necesitarían unos50.000 julios, en el supuesto optimista de que la totalidad de la energía se utilizase en volatilizar los tejidos.



8. En un láser químico característico de alta potencia se disponen los combustibles, como el hidrógeno y el flúor, en una cámara de combustión, y luego se enciende la mezcla para formar fluoruro de hidrógeno excitado. Ese fluoruro de hidrógeno pasa entre los espejos del láser, de donde se extrae su energía de excitación para formar el haz de luz. Con el fin de mejorar el rendimiento se produce flúor atómico en la cámara de combustión y se mezcla con el hidrógeno en los inyectores de expansión. La reacción química se produce cuando el gas se desplaza hacia la derecha. La presión disminuye cuando el gas ha atravesado los inyectores de expansión, y esa expansión es importante, ya que el láser de fluoruro de hidrógeno funciona mejor cuando la presión del gas es muy reducida. La baja presión dificulta la expulsión del gas directamente a la atmósfera, lo que es realmente una ventaja, puesto que el fluoruro de hidrógeno al entrar en contacto con la humedad de la atmósfera se convierte en ácido fluorhídrico que es altamente corrosivo.

No obstante, si se prescinde del tamaño es posible construir un láser capaz de matar a una persona. El ejército dispone ya de semejantes artefactos, y en realidad con ciertos láseres quirúrgicos se podría cortar el cuello de un paciente inmovilizado. Sin embargo, para matar a un soldado en las condiciones predominantes en un auténtico campo de batalla se precisaría un artefacto del tamaño de un tanque como mínimo. En cuanto a su capacidad mortífera, no cabe duda de que las armas de fuego ofrecen innumerables ventajas comparadas con los láseres, y por consiguiente no es necesario que los miembros de la Asociación nacional de armas de fuego se preocupen en lo más mínimo.

LAS AUTÉNTICAS ARMAS LÁSER

Las auténticas armas láser tienen mucho en común con los túneles de viento, y ésta es la razón de que las grandes compañías aeroespaciales colaboren en su perfeccionamiento, como lo demuestran los ejemplos de la Lockheed Missiles and Space Company, el departamento Rocketdyne de la Rockwell International Corporation y la TRW Inc. El medio activo que utilizan dichos láseres es un gas que fluye a gran velocidad a través de unos inyectores diseñados especialmente. En muchos casos, la velocidad es supersónica, es decir, superior a la del sonido, y después de pasar por los inyectores se extrae su energía para convertirla en un haz láser. Los dos modelos predilectos desde el punto de vista bélico son los de descarga eléctrica y los químicos.

El elemento activo de los láseres de descarga eléctrica suele ser el dióxido de carbono excitado por una descarga de alto voltaje o por un haz de electrones, y emiten luz infrarroja invisible en una longitud de onda de 10,6 micrómetros (0,01 mm). Dicha luz se transmite con facilidad a través de la atmósfera, pero es fuertemente reflejada por todos los metales. Uno de los problemas principales de que adolecen dichos aparatos es el volumen y peso de la mayoría de los equipos eléctricos de alimentación necesarios.

La energía de los láseres químicos procede, por lo general, de la reacción entre átomos de hidrógeno y flúor (véase el diagrama N.° 8). Aparentemente parece que el proceso sea sencillo, pero no es así. En primer lugar, tanto el hidrógeno como el flúor en estado puro son difíciles de manipular. El comportamiento del flúor puede ser desagradable, como, por ejemplo, cuando provoca la explosión de un depósito de acero inoxidable sin previo aviso. Con el fin de evitar semejantes tragedias, ambos combustibles se preparan en forma de mezclas de mayor estabilidad y más fácil manejo. En segundo lugar, la longitud de onda que se produce cuando un láser se alimenta de hidrógeno normal es fuertemente absorbida por la atmósfera, y por consiguiente se ven obligados a utilizar deuterio, un raro isótopo pesado, con el fin de que se produzcan longitudes de onda de 3,7 a 4 micrómetros (0,0037 a 0,004 mm), cuya transmisión es más fácil. En tercer lugar, debido a que la reacción tiene lugar a una presión muy inferior a la de la atmósfera circundante, resulta difícil desprenderse de los gases resultantes que, de por sí, constituirían una temi-

ble arma química, puesto que se trata de fluoruro de hidrógeno, que en contacto con el agua o incluso con la humedad normal de la atmósfera se convierte en ácido fluorhídrico. Se trata, por tanto, de un arma que, si no se manipula con extrema precaución, no sólo es capaz de destruir el objetivo, sino también a los operadores.

Estos son los problemas técnicos que los militares intentan superar. Por ejemplo, el ejército procura perfeccionar el combustible y los recipientes adecuados para recoger los gases resultantes de los láseres químicos. Por otra parte, el Pentágono estudio el potencial de otros láseres, tales como los excimer, los de electrones libres e incluso los de rayos X, a pesar de los múltiples problemas técnicos que aún habrá que superar.

ATRACTIVO DE LAS ARMAS LÁSER

Evidentemente, el objetivo primordial de esos descomunales láseres no son los seres humanos. En lenguaje gubernamental se diría que la rentabilidad de las armas de fuego en su capacidad de destrucción humana es superior. Sin embargo, la guerra está dejando de consistir en una simple matanza de gente. En una contienda moderna es mucho más importante destruir tanques, aviones, buques y proyectiles enemigos. Los láseres forman parte de la nueva tendencia a automatizar y electronifícar el campo de batalla, aportando soluciones a algunos problemas importantes de los que adolecen las armas actuales.

En primer lugar, cuando se dispara una bala o un proyectil contra un objetivo en movimiento se debe apuntar a un lugar todavía no alcanzado por dicho objetivo, para lo cual es preciso medir con exactitud su velocidad en sentido tridimensional, lo que no siempre resulta fácil. En segundo lugar, el objetivo puede eludir el disparo si reduce su velocidad, acelera o cambia de dirección. Un problema sobradamente conocido por quienes practican el tiro al plato consiste en que la fuerza de la gravedad atrae la bala hacia el suelo y, por consiguiente, es necesario apuntar a una altura superior a la del objetivo.

El haz láser se desplaza a la velocidad de la luz, es decir a 300.000 kilómetros por segundo. Dicha velocidad es tan superior a la de cualquier artefacto bélico, que al hacer el disparo no hay que realizar operación alguna, a no ser que se trate de un objetivo sumamente lejano. Según J.

Richard Airey, director de tecnología de energía dirigida del departamento de investigación e ingeniería de la subsecretaría de defensa, «la luz láser tarda una seis millonésima de segundo en desplazarse 1,8532 km, en cuyo tiempo un avión supersónico que se desplazase a una velocidad doble a la del sonido habría recorrido apenas 3,18 mm».

Esa es la mayor ventaja que ofrecen los láseres bélicos, pero además existen otras:

1) Debido a que la dirección del haz es gobernada por espejos, se puede variar de un objetivo a otro con gran rapidez a través de un amplio campo de visión, es decir, que no es preciso mover el aparato entero como ocurre con las armas convencionales, sino que basta con ajustar los espejos.

2) A causa de que el rayo láser es recto y delgado, permite la localización y destrucción de un solo objetivo enemigo, aun cuando esté rodeado de vehículos de un mismo bando.

3) Cada «disparo» del láser precisa una cantidad relativamente reducida de combustible (la cifra exacta es secreto de Estado), y por tanto se puede almacenar suficiente combustible para realizar numerosos disparos.

4) Un rayo láser puede desplazarse a grandes distancias sin perder energía y con una mínima divergencia; por consiguiente, con lentes adecuadas sería concebible destruir objetivos a miles de kilómetros.

5) Es probable que un láser logre destruir el objetivo en escasos segundos.

6) Las técnicas concebidas en los proyectiles dirigidos para confundir a los sistemas electrónicos no afectan a los haces láser, los cuales podrían utilizarse contra el sistema electrónico de control de éstos.

7) Por extraño que parezca, es posible que los láseres bélicos resulten relativamente rentables, puesto que si bien el coste de un láser de alta potencia es sumamente elevado, el precio de cada uno de sus disparos será sin duda reducido, debido a que se puede utilizar contra numerosos objetivos, mientras que con un proyectil únicamente se puede realizar un solo disparo. El coronel Holmes, agregado militar de la Airey, ha declarado que el coste de los proyectiles Patriot oscila entre los 300.000 y los 500.000 dólares por unidad, y que incluso los proyectiles de corto alcance Stinger cuestan 20.000 dólares cada uno. Sin embargo, la cantidad de combustible utilizada en cada disparo por un láser químico de deuterio

—isótopo pesado de hidrógeno cuyo coste es muy elevado— costaría entre 1 000 y 2 000 dólares, es decir, «un precio similar al de una ráfaga de balas». Y también, según el coronel Holmes, el precio de un disparo realizado con un láser de dióxido de carbono bombeado eléctricamente sería escasamente de unos centenares de dólares.

ARMAS TÁCTICAS

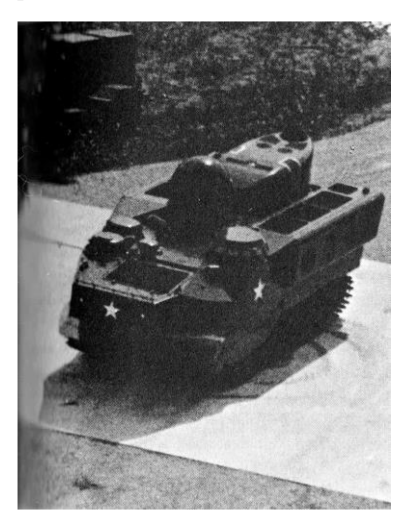
Los láseres bélicos, al igual que el resto de las armas, pueden dividirse en tácticos y estratégicos. La función de las armas tácticas consiste en crear circunstancias favorables durante el transcurso de una batalla, mientras que con las estratégicas se procura establecer cierta ventaja antes de que aquélla estalle. En realidad, una de las funciones de las armas estratégicas consiste en disuadir al contrincante en su empeño bélico, haciéndole comprender que perderá la batalla o, como mínimo, sufrirá numerosas bajas.

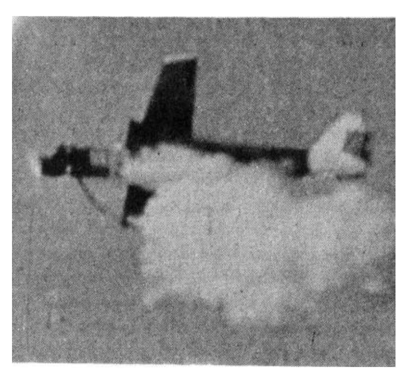
Un láser situado en una base espacial capaz de destruir proyectiles balísticos poco después de su lanzamiento sería un arma estratégica, y una de sus funciones consistiría en persuadir al enemigo de que no vale la pena que lance los proyectiles en cuestión. Sin embargo, un láser instalado en un tanque cuya función consistiese en la defensa de su propio vehículo, así como la de otros objetivos, constituiría un arma táctica. Ocupémonos en primer lugar de este segundo grupo.

Cada una de las tres fuerzas armadas estadounidenses desarrolla su propio programa de láseres tácticos desde principios de los años setenta, y según los militares su función consiste en «verificar su capacidad mortal» durante la primera parte de nuestra década. En lenguaje común, eso significa que los científicos deben demostrar que los láseres son capaces de destruir los objetivos en los que se interesan los respectivos ejércitos y que el coste de la operación ha de ser razonable. No esperan que las armas estén listas para ser trasladadas al campo de batalla, sino simplemente que demuestren, en principio, su capacidad bélica. Sólo entonces comenzarán los militares a diseñar las armas propiamente dichas.

El programa de mayor envergadura es el de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos, que se interesan por los láseres bélicos tanto para sus bombardeos defensivos como para los cazas tácticos. Su lugar de exhibición

es el laboratorio láser volante, que consiste en un láser de dióxido de carbono instalado en la versión militar del avión Boeing 707. El láser construido a principios de los años setenta, junto con su unidad de alimentación y elementos auxiliares, ocupa la mayor parte del espacio disponible en el interior del avión. (Se trata de un anticuado modelo dinámico de gas de alta potencia, que en realidad fue el primero de su género en ser descubierto y que en la actualidad ha sido superado por los láseres químicos y los de descarga eléctrica.) Con dicho artefacto, en 1973 lograron destruir un aeroplano de control remoto en pleno vuelo, y en 1981 se proponían destruir un proyectil aire-aire cuyo objetivo fuese el propio laboratorio. Sin embargo las Fuerzas Aéreas han preferido no arriesgar su costoso juguete y han modificado la prueba de forma que el proyectil no pueda derribar el láser volante.





El avión teledirigido ha sido derribado...

...por un láser instalado en este tanque modificado del Marine Corps estadounidense. Department of Defense (EE. UU.)

El programa de la Marina de Estados Unidos, que en 1981 llegaba apenas a la mitad del de la aviación, tiene como fin proteger los buques contra ataques aéreos, en especial los provocados por misiles crucero. En una prueba que se realizó durante el mes de marzo de 1978 en San Juan de Capistrano, California, la Marina destruyó un proyectil antitanque con un láser químico. Las próximas pruebas que se lleven a cabo se realizarán con un láser químico de fluoruro de deuterio de mayores dimensio-

nes, llamado MIRACL, cuyo nombre corresponde a las iniciales inglesas de «láser químico avanzado de infrarrojo intermedio». Durante la primera mitad de esta década el MIRACL intentará proteger un barco en un ataque simulado con un misil crucero en el campo de proyectiles de White Sands, Nuevo México, donde el Departamento de defensa está construyendo un nuevo campo de pruebas nacional para láseres de alta potencia. Sólo el equipo de dirección del haz denominado Sea-Lite costará más de 10 millones de dólares, y es probable que el coste del propio láser sea algo superior.

En 1976, el ejército de tierra destruyó aviones y helicópteros teledirigidos con un láser bombeado eléctricamente en el arsenal de Redstone, en Alabama. El láser utilizado fue bautizado con el nombre de Mobile Test Unit e instalado en un tanque modificado de la infantería de marina LTVP-7. En el campo de batalla, al ejército le gustaría utilizar láseres contra aviones y proyectiles aéreos así como para proteger objetivos de «alto valor» en la retaguardia. Para dicho proyecto se necesitarían muchísimos aparatos, y el coste de un tanque moderno es superior a un millón de dólares. Los observadores militares opinan que el precio de una unidad móvil de campaña oscilaría entre los 5 y los 10 millones de dólares. Evidentemente, antes de que el ejército se decida a construir láseres bélicos se le debe ofrecer una «demostración técnica convincente», ha afirmado el coronel Holmes.

LÁSERES BÉLICOS ESTRATÉGICOS

Los láseres bélicos para uso estratégico provocan las más enmarañadas polémicas. Debido a que dichos aparatos serían capaces de destruir bombarderos y proyectiles teledirigidos, podrían desequilibrar la balanza del poder basada en la seguridad de la destrucción mutua, es decir, la capacidad por parte de Estados Unidos y la Unión Soviética de aniquilarse mutuamente en el caso de que se desencadenase entre ambos una guerra nuclear. Los sistemas láser de alta potencia instalados sin duda en el espacio podrían constituir quizá una defensa eficaz, no sólo contra los proyectiles intercontinentales lanzados desde bases terrestres, sino además contra bombarderos nucleares y proyectiles balísticos lanzados por

submarinos. Más adelante nos detendremos en la polémica, pero ahora nos ocuparemos de las armas propiamente dichas.

La estación bélica orbital es la que mayor interés ha despertado. La primera versión llegó al conocimiento público a finales de 1979, cuando los representantes de cuatro empresas (la Lockheed Aircraft Corporation, TRW Inc., Perkin Elmer Corporation y Charles Stark Draper Laboratory) que tienen contratos de defensa con el Estado lograron convencer al senador republicano de Wyoming, Malcolm Wallop, de que era factible construir dicho sistema «en un futuro relativamente próximo». «Los cuatro de la banda de Lockheed», como algunos críticos optaron por denominarlos, propusieron la puesta en órbita de 18 satélites equipados con láseres de alta potencia cuyo coste global sería de unos diez mil millones de dólares. En cada satélite se instalaría un láser de 5 millones de vatios, un espejo de cuatro metros para focalizar la energía sobre el objetivo, un apuntador-rastreador para dirigir el haz, un equipo de detección de objetivos, y un sistema de control electrónico.

Wallop dijo que la primera generación (de dicho sistema) «ofrecería protección contra todos los proyectiles pesados soviéticos, alrededor de 300 proyectiles balísticos intercontinentales, prácticamente la totalidad de los proyectiles balísticos lanzados desde submarinos y todos los bombarderos de largo alcance, así como los equipados con misiles crucero». Estos cálculos se basaban en la suposición de que la Unión Soviética pudiese disparar la totalidad de sus sistemas estratégicos alrededor del mundo en menos de 15 minutos.

Se utilizarían tres órbitas diferentes alrededor de ambos polos de la tierra con seis satélites láser en cada uno de ellas, cubriendo esencialmente la totalidad del planeta. Cada láser sería capaz de realizar unos 1 000 disparos con un alcance «algo inferior a los 5 000 kilómetros». Gracias a su armadura, los satélites estarían protegidos contra explosiones nucleares que pudiesen tener lugar cerca de ellos, pero serían vulnerables al ataque de otros láseres de alta potencia que se encontrasen fuera de su alcance.

Recientemente han aparecido versiones más espectaculares de satélites equipados con láseres de rayos X en la revista *Aviation Week and Space Technology.* Los autores de dicho artículo proponían que los nuevos satélites contuviesen una serie de láseres de rayos X y una bomba nuclear. En el caso de que el enemigo desencadenase un ataque, cada

láser de rayos X (consistente en un cristal largo y delgado) apuntaría a uno de los proyectiles del contrincante y se detonaría la bomba con el fin de producir las pulsaciones necesarias para activar los láseres, destruyendo naturalmente el satélite al mismo tiempo. La idea se basa en el supuesto de que las pulsaciones ultracortas y de gran intensidad de los rayos X no sólo destruirían los circuitos electrónicos de los proyectiles, sino que incluso quizá penetrarían su armadura. La mayoría de los expertos se mostraron sumamente escépticos ante la perspectiva de construir láseres bélicos de rayos X, y el más correcto de los comentarios consistió en afirmar que se trataba de una propuesta «prematura». Los funcionarios del Gobierno se han limitado a guardar el silencio más absoluto.

Los militares se interesan por los satélites láser debido a su evidente importancia estratégica. La colocación de láseres en el espacio contribuiría también a reducir los problemas que presenta la propagación de sus haces a través de la atmósfera. Sin embargo, el Departamento de defensa todavía considera que la colocación de láseres de alta potencia en el espacio supone un «alto riesgo» debido a que, para poder lanzarlos, es preciso que sean ligeros, reducidos y capaces de funcionar sin intervención humana.

También hay quienes creen que no habrá láseres en el espacio durante este siglo, y en realidad cabe que no los haya jamás. A pesar de que admite la posibilidad de que se construyan láseres lo suficientemente potentes como para destruir un objetivo, Michael Callaham, de la universidad de Carnegie-Mellon, y Kosta Tsipis, del Instituto de tecnología de Massachusetts, no creen que sea posible transferir la cantidad necesaria de energía a un objetivo con suficiente eficacia. En un informe publicado a finales de 1980, también manifestaron que no sería difícil perfeccionar medidas de seguridad que protegerían los objetivos ante un ataque láser y que la colocación de láseres bélicos en el espacio sería complicada y sumamente costosa, a causa de la cantidad de combustible que habría que utilizar. Además expresaron su preocupación en el sentido de que la instalación de láseres bélicos en el espacio podría estimular al contrincante a lanzar un ataque, ante el temor de que el sistema en cuestión *funcionase*. El informe recomendaba que Estados Unidos dedicase sus esfuerzos al perfeccionamiento de contramedidas en lugar de láseres bélicos, y que sólo se construyesen los láseres de alta potencia necesarios para poner a prueba dichas contramedidas.

La polémica no se resuelve con facilidad. Los portavoces de ambos bandos suelen ser aquellos cuyas firmes convicciones tienden a ofuscar la claridad de su juicio. Los fabricantes de armamento constituyen, sin duda alguna, una parte interesada que se beneficiaría económicamente de la construcción de dichas armas. A los políticos conservadores, como el senador Wallop, les gustaría poseer una nueva y espectacular arma para exhibirla ante los rusos, además de favorecer el desarrollo de aquellos campos de la tecnología bélica por los que se sepa que la Unión Soviética también siente interés. Los oficiales del ejército de Estados Unidos suelen ser partidarios de que su país posea una mayor cantidad de armas de mejor calidad, a pesar de que los altos funcionarios de Pentágono han mostrado en general una actitud moderada y cautelosa con relación a los láseres bélicos.

Por otra parte, los políticos liberales, suelen oponerse a la construcción de armas nuevas y costosas por razones ideológicas, y en algunos casos los científicos de tendencias liberales dedican demasiada energía a la acumulación de razones que demuestren que las nuevas armas no surtirán el efecto deseado. Existe también el fenómeno conocido como «la primera ley de Clarke», en honor al autor de ciencia-ficción Arthur C. Clarke, que afirmó: «Cuando un científico distinguido, pero anciano, afirma que algo es posible, casi con toda seguridad está en lo cierto. Cuando afirma que algo es imposible, con toda probabilidad se equivoca.» (La cita procede del libro titulado *Perfil del futuro*, en donde Clarke califica de «anciano» al físico que ha cumplido los treinta.)

Otra posibilidad es la que sugiere un experto en control de armamento de la Briarcliff Manor, Nueva York, llamado Barry J. Smemoff; dice que ciertos altos funcionarios del Departamento de Defensa de los Estados Unidos están tan acostumbrados a la actual situación estratégica basada en la seguridad de la destrucción mutua que se niegan a admitir que algún nuevo descubrimiento tecnológico pueda abrir nuevos horizontes.

LA DIPLOMACIA, EL CONTROL DE ARMAMENTO Y LOS LÁSERES

A primera vista, las estaciones bélicas orbitales serían una bendición para la estabilidad del globo. Podrían destruir proyectiles o bombarderos con armamento nuclear mucho antes de que alcanzasen sus objetivos. Ya no tendríamos por qué vivir aterrorizados.

Sin embargo, la perspectiva no es en realidad tan halagüeña. Si bien a las familias del mundo entero puede que no les guste la idea de una guerra termonuclear sin cuartel cuando no se dispone de sistema defensivo alguno, tanto los estrategas militares norteamericanos como los rusos se han acostumbrado a ella. Y son precisamente ellos —y no los demás— quienes pueden apretar el botón nuclear.

He ahí el problema. Supongamos que uno de los bandos perfeccione un sistema láser para protegerse de los proyectiles. Muy bien, pero se necesitaría cierto tiempo para colocarlo en órbita y asegurarse de que su funcionamiento era correcto. Callaham y Tsipis creen que si uno de los bandos comenzase a construir una estación espacial láser, al otro bando le costaría muchísimo resistir la tentación de destruirla antes de que estuviese terminada a no ser que lo considerasen anticuado desde el punto de vista estratégico. La destrucción de las estaciones bélicas induciría probablemente al bando perjudicado a tomar represalias que conducirían quizás a una guerra nuclear sin cuartel.

El Tratado de limitación de armas estratégicas (SALT I) prohíbe cualquier sistema de defensa antiproyectiles, como las estaciones bélicas láser. Sin embargo, en el clima político actual cabe admitir la posibilidad de que uno o ambos bandos hagan caso omiso de lo acordado en el tratado SALT I, al igual que se ha ignorado el convenio firmado por ambos bandos en 1967, en el que se prohibía el uso del espacio para fines militares. El sistema propuesto por el senador Wallop, por ejemplo, violaría impunemente ambos convenios. Sin embargo, también es preciso aclarar que los tratados vigentes sólo prohíben la instalación de dichos sistemas, pero no su estudio.

Los encargados de negociar controles de armamento son perfectamente conscientes de los problemas que suponen los láseres bélicos, no sólo para defenderse de los proyectiles, sino también por su capacidad de

destruir satélites, y constituyen uno de los temas sometidos a debate en las conversaciones del convenio SALT II.

En un análisis global del impacto potencial de los láseres bélicos en la estrategia defensiva, Smernoff formuló la siguiente advertencia:

> La instalación de láseres bélicos en el espacio *no* constituirá un paso tecnológico desprovisto de riesgos ante el problema, profundamente arraigado, de las armas nucleares y la guerra atómica. Sin embargo, a largo plazo, lo importante consiste en descubrir si Estados Unidos logrará conciliar el conocimiento y consenso necesarios a nivel nacional para enfrentarse al reto estratégico que supone la aparición de dichas armas y, al mismo tiempo, establecer un equilibrio práctico entre la competencia militar y la cooperación política con la Unión Soviética. De no ser así, los dirigentes norteamericanos del futuro probablemente preferirían que los láseres bélicos hubiesen sido un mero espejismo estratégico en lugar de una revolución. Tal es la seriedad de las implicaciones potenciales de reformar la política defensiva y el control armamentista.

LÁSERES ANTISATÉLITE

Un primer paso hacia el uso de láseres de alta potencia en el espacio consistiría en construir armas capaces de cegar o inutilizar satélites, que, si bien no son tan decisivas como los sistemas antiproyectiles, tienen también su importancia. Tanto Estados Unidos como Rusia confían en los satélites para vigilarse mutuamente y, además, para sus comunicaciones militares, para la navegación, para controlar pruebas nucleares y, naturalmente, para advertir de un ataque con proyectiles balísticos.

Los satélites son una presa relativamente fácil. Con un láser de alta potencia se pueden dañar sus sensibles detectores o las células solares que se usan en algunos casos como fuente de energía. Cabe también la posibilidad de que se logre inutilizar los satélites destruyendo el sensor que les permite mantenerse en una posición estacionaria con relación a la superficie de la tierra.

No hay necesidad de colocar dichas armas en el espacio; el haz de un láser de alta potencia situado en la tierra puede ser dirigido contra un satélite y, debido a que la potencia requerida para inutilizarlo es relativamente baja, los problemas relacionados con la dirección del haz, que constituye uno de los obstáculos primordiales de los láseres bélicos, no

tendrían gran importancia. En lugar de concentrarse en un punto de escasos centímetros de diámetro, el rayo podría cubrir una zona mucho más amplia que incluyese la totalidad del satélite.

Una vez más, el problema estriba en saber si el satélite habrá sido inutilizado y el momento en que haya podido ocurrir, lo cual resultará sumamente difícil en el caso de que siga transmitiendo información codificada que no sepamos descifrar. Una indicación de que el satélite ha sido inutilizado sería el hecho de que las señales que transmitiese se convirtiesen repentinamente en uniformes a causa de que todos los elementos del sensor emitiesen la misma señal, lo que significaría que ha sido quemado. Sin embargo, no debería ser excesivamente difícil proyectar un satélite que codificase la información con mayor complejidad, y es muy probable que los militares lo hayan hecho ya a partir del momento en que comenzaron a considerar la posibilidad de los láseres bélicos antisatélites.

LAS ARMAS RUSAS

Han aparecido informes, generalmente tenidos por verídicos en la comunidad defensiva, que afirman que los láseres soviéticos han logrado alcanzar brevemente algunos satélites espías norteamericanos. La noticia no es sorprendente y, en el supuesto de que sea cierta, no significa que los rusos dispongan de láseres antisatélite en disposición de operar. Una cosa es tocar un satélite en un momento dado, y otra repetir la operación cuando se desee. Puede que nos hayan pasado desapercibidas cincuenta tentativas rusas antes de que lograsen su objetivo, y éste no es el nivel de precisión que se espera de los instrumentos militares. Es esencial que los artefactos bélicos funcionen debidamente en cada ocasión. Por ejemplo, en el caso de que los rusos quisiesen ocultar el lanzamiento de proyectiles intercontinentales cegando los satélites espía norteamericanos, deberían tener la *seguridad* de que los habían inutilizado, y es evidente que no bastaría con lanzar simplemente un haz láser hacia ellos.

Sin embargo, de lo que no cabe duda es de que en la Unión Soviética se realizan claramente muchos trabajos relacionados con los láseres de alta potencia. En cada ejemplar de la publicación científica rusa mensual *Kvantum Elektronika* (la óptica cuántica es la rama de la física que con-

templa el estudio de los láseres) aparecen generalmente varios artículos que tratan de los láseres de alta potencia o de sus efectos sobre materiales diversos. El número de artículos de esta índole que se publican en las revistas occidentales es considerablemente inferior.

Es difícil estimar con exactitud el esfuerzo que los rusos dedican al desarrollo de los láseres de alta potencia. Ciertas fuentes militares consideran que es de tres a cinco veces superior al de Estados Unidos, cuyo presupuesto anual, entre 1978 y 1980, ha sido de 200 millones de dólares.

En 1979, J. Richard Airey, director del desarrollo de energía dirigida del Pentágono, hizo la siguiente declaración ante una subcomisión del Senado:

> Parece ser que la Unión Soviética concentra enormes recursos en la tecnología de los láseres de alta potencia. En particular cabe la posibilidad de que hayan comenzado a desarrollar con ella algún tipo de armamento. Por otra parte, nosotros hemos decidido que, durante los próximos años, los láseres de alta potencia sigan formando parte de un programa tecnológico. Estamos convencidos de que comprendemos los pasos técnicos necesarios para traducir la tecnología de los láseres de alta potencia en un sistema bélico, de que nuestra decisión es correcta y de que los soviéticos pueden estar avanzando prematuramente hacia los sistemas bélicos. Sin embargo, revisamos continua y cuidadosamente nuestros programas, además de observar con gran interés el progreso soviético para valorar una y otra vez la presente decisión.

La diferencia filosófica a la que hace referencia Airey es fundamental. En algunos casos, los soviéticos canalizan una enorme cantidad de recursos en algún proyecto cuyos objetivos son sumamente concretos mientras que en Estados Unidos se tiende a valorar las posibilidades durante mucho tiempo (lo que Airey denomina «programa tecnológico»). Ciertos adversarios de la política defensiva estadounidense han alegado que la persistente concentración de esfuerzos en la investigación tecnológica, en lugar de aplicar rápidamente las nuevas ideas a la fabricación de armamento, refleja una indecisión general. Sin embargo, también refleja la acertada convicción de que existen numerosos obstáculos técnicos a superar *antes* de que el ejército pueda utilizar láseres bélicos en el campo de batalla.

LA FLORACIÓN TÉRMICA... Y OTROS PROBLEMAS

La fabricación del láser es sin duda la parte más fácil de la construcción de un sistema láser bélico. Incluso adversarios del sistema como Callaham y Tsipis, han admitido la posibilidad de construir un láser con gran capacidad destructiva. El problema estriba en transmitir la energía desde el láser hasta el objetivo.

El obstáculo más evidente es la atmósfera, cuya capacidad para transmitir la luz es muy inferior a la que aparenta. Las nubes, la lluvia, la nieve, la niebla y el humo obstaculizan el paso de los haces de luz láser. Mientras que el agresor puede elegir las condiciones meteorológicas que mejor se adapten a su armamento, éste es un lujo que la defensa no puede permitirse, y se supone que la función primordial de los láseres bélicos será defensiva. Resultaría, por ejemplo, lógico atacar un buque equipado con láser cuando reinase una espesa niebla y probablemente sus haces de luz no lograsen llegar muy lejos. También es posible crear cortinas de humo en los campos de batalla, por ejemplo por combustión incompleta de fuel-oil, que dificulten su efectividad. Por consiguiente, y a pesar de que los láseres de alta potencia puedan ser capaces de atravesar las nubes, la niebla y la nieve, las condiciones climatológicas constituyen todavía uno de los principales problemas para los láseres tácticos en el campo de batalla.

Incluso cuando el cielo está perfectamente claro, la atmósfera absorbe una pequeña cantidad de la luz que la atraviesa y que, si bien con la luz solar no es siquiera perceptible, en el caso de los haces láser de alta potencia puede constituir un problema. El haz calienta ligeramente el aire y causa una pequeña dilatación del mismo a partir de su centro que lo convierte en menos denso que el aire circundante, de forma que el aire atravesado por el rayo actúe como una débil lente divergente para el haz de luz. A pesar de la pequeña divergencia causada el fenómeno es significativo cuando la distancia que debe recorrer el haz es extensa y se desea concentrar la energía en un pequeño punto del objetivo. Dicho fenómeno recibe el nombre de *floración térmica* debido a que el calor provoca la divergencia o «floración» del haz.

Existen también otros problemas atmosféricos. El haz tiende a desplazarse del objetivo debido a corrientes de aire y otras fluctuaciones accidentales de la atmósfera. Y puede ser también *excesivamente* potente.

Cuando se sobrepasa cierto nivel, las moléculas del aire suelen desintegrarse liberando electrones y iones que forman un plasma protector alrededor del objetivo que absorbe el haz. Y puede ocurrir otro tanto con el material volatilizado del objetivo. Debido a la combinación de dichos procesos, la propagación atmosférica y las interacciones del haz con el objetivo pueden constituir temas de gran complejidad.

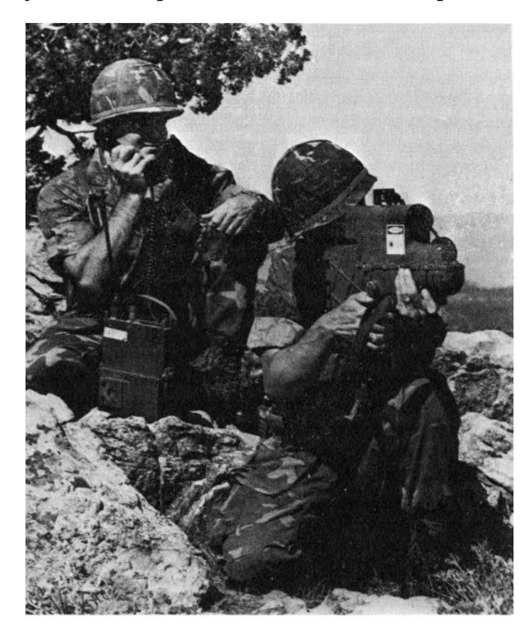
LOS ESPEJOS DE GOMA Y EL CONTROL DE TIRO

Afortunadamente existen métodos para controlar dichos problemas. La mejor solución estriba en disparar un haz láser, o cualquier otro tipo de luz, en dirección al objetivo y después de comprobar los efectos de la atmósfera ajustar debidamente el haz para compensar las distorsiones. El método adoptado es el de la utilización de espejos.

Los expertos los denominan «espejos de goma» debido a que sus superficies son flexibles y pueden ser controladas con suma precisión con la ayuda de computadoras. Es esencial que la precisión sea absoluta, puesto que la forma del espejo debe ser controlada hasta una minúscula fracción de la longitud de onda de la luz y reajustada unas mil veces por segundo para compensar las continuas fluctuaciones de la atmósfera. Los sensores a su vez deben ser capaces de detectar con absoluta precisión las condiciones atmosféricas, procesar rápidamente una enorme cantidad de datos y ajustar continuamente el espejo de ultraprecisión. Si bien el progreso realizado tanto en los equipos de detección y control como en los propios espejos es muy considerable, todavía queda mucho trabajo por realizar antes de que puedan utilizarse en la práctica.

Los espejos, dicho sea de paso, deben ser enormes. Los diseñadores de láseres bélicos hablan tranquilamente de espejos de 4 m de diámetro, lo que representa un tamaño considerablemente superior al del telescopio de Monte Wilson y casi tan grande (75%) como el del gigantesco observatorio de Monte Palomar. Los espejos de dichos telescopios son sumamente delicados, de muchas toneladas de peso y absoluta rigidez. Sin embargo los utilizados por los láseres bélicos deben ser flexibles y lo suficientemente ligeros para poder transportar todo el equipo con cierta facilidad, incluso puede que tengan que sobrevivir a un lanzamiento sin que su forma se altere imprevisiblemente. Dichas características se en-

cuentran fuera del alcance de los fabricantes de productos ópticos y sin embargo un diámetro de 4 m es prácticamente el mínimo necesario para los láseres bélicos espaciales. Algunos expertos hablan incluso de espejos de 30 m para ser utilizados en el espacio.



Estos soldados utilizan un señalizador láser para dirigir misiles o bombas hasta el objetivo. Con este aparato los soldados pueden señalizar un blanco desde una distancia de hasta seis kilómetros.

Hughes Aircraft Company

También se precisa lo que se denomina *sistema de control de tiro* cuya función consiste en fijar el haz sobre el objetivo, disparar el láser y asegurarse de que el objetivo haya sido destruido. En general es mucho más complejo que en las películas donde el héroe se limita a apuntar visualmente hacia el objetivo, apretar un botón y comprobar con la mirada la explosión del blanco. El sistema de control de tiro debe localizar uno de los puntos vulnerables del objetivo (y puede que escaseen), ajustar el espejo de salida para compensar las condiciones atmosféricas, enfocar el haz hacia un punto vulnerable y mantenerlo en dicha posición el tiempo necesario para destruirlo. (El efecto de una serie de pulsaciones sería despreciable si variase el punto de impacto.) Debe comprobar que el objetivo ha sido destruido, lo cual con toda probabilidad no será fácil, a

no ser que estalle el depósito de combustible o algún otro componente. Se trata, pues, de un complejo aparato cuyo coste es similar al del propio láser.

Su colocación fuera de la atmósfera simplificaría algunos problemas relacionados con la dirección y control del haz de luz, pero no dejaría de ser difícil concentrarlo con precisión en una zona de escasos centímetros cuadrados a más de mil kilómetros de distancia. Por ejemplo un sistema láser espacial antiproyectiles dispondría quizá de unos quince minutos para destruir varios centenares de proyectiles enemigos con una fulminante cabeza nuclear en cada uno de ellos.

Todo este complejo sistema, tanto si se instala sobre la tierra como en el espacio, debe ser «militarizado» de forma que su manejo y mantenimiento pueda correr a cargo de simples soldados sin que hayan debido doctorarse previamente en física. Además, el láser debe ser capaz de sobrevivir en condiciones hostiles y funcionar con eficacia (es decir destruir un objetivo cuando las circunstancias lo requieran). Finalmente su precio debe ser razonable o en terminología militar coste-eficaz, lo que significa que su poder destructivo tiene que ser proporcional a su valor en metálico.

CONTRAMEDIDAS

Al mismo tiempo otros investigadores militares estudian métodos destinados a contrarrestar los efectos de los láseres bélicos. Por una parte intentan perfeccionar superficies que reflejen una fracción suficiente del haz como para que su poder destructivo sea despreciable o nulo y por otra parte estudian la posibilidad de utilizar materiales cuya rápida vaporización cree una cortina de humo que proteja el objetivo.

Callaham y Tsipis mencionaron también la posibilidad de lanzar múltiples señuelos entremezclados con los auténticos proyectiles para confundir el sistema de control de tiro de los láseres bélicos. Cabe mencionar que tal fue la impresión que les causaron las posibilidades de dicho campo que sugirieron que Estados Unidos se dedicase plenamente a perfeccionar los láseres bélicos en calidad de contramedida en lugar de procurar convertirlos en armas propiamente dichas.

Finalmente, los láseres bélicos también deben estar dotados de sistemas defensivos. Supongamos por ejemplo que la Unión Soviética se propusiese lanzar un ataque con proyectiles y que Estados Unidos dispusiese de estaciones láser bélicas en el espacio; indudablemente algunos proyectiles se dirigirían a dichas estaciones y no sólo a Omaha y Washington. Sería necesario protegerlas, además, de otras armas antisatélite entre las que figurarían, sin duda, otros láseres. Cada estación espacial debería estar dotada, a su vez, de todas las medidas antiláser necesarias.

Probablemente, lo más difícil sería proteger las estaciones en el espacio durante su construcción. A no ser que tenga lugar algún espectacular descubrimiento relacionado con el tamaño y a complejidad de los aparatos necesarios, no será posible lanzarlas en condiciones de funcionamiento inmediato, sino que será preciso montarlas en el espacio. Un proyecto de tal envergadura no podría llevarse a cabo sin el conocimiento del enemigo y difícilmente dispondría de defensas eficaces contra un ataque directo.

Deseamos aclarar que nuestra intención no es la de presentar una imagen pesimista con relación al futuro de los láseres bélicos, como lo han hecho Callaham y Tsipis, sino simplemente puntualizar las múltiples dificultades que deben ser superadas. No obstante es pertinente recordar que en los años 40 muchos físicos confeccionaron una lista de obstáculos igualmente extensa con relación a la construcción de la bomba atómica.

EL ESCENARIO DE LOS LÁSERES BÉLICOS (DESPIDÁMONOS DE *LA GUERRA DE LAS GALAXIAS*)

A estas alturas debe ser perfectamente evidente que los láseres bélicos de *La guerra de las galaxias* y otras películas de ciencia-ficción no tienen nada que ver con lo que serían los auténticos.

En primer lugar se tratará de armas de *gran tamaño*, e incluso las de tipo táctico necesitarán probablemente un tanque o un avión para poder desplazarse por el campo de batalla. Puede que un soldado apriete el disparador, pero lo más probable es que estén dotados de sistemas electrónicos que dirijan el haz hacia el objetivo, después de haberlo identificado, ya sea manual o electrónicamente.

El disparo consistiría en una serie de pulsaciones de alta potencia o en un haz continuo dirigido al objetivo. El haz se fijaría sobre un objetivo determinado durante unos escasos segundos y después de que el sistema de control de tiro verificase el posible éxito del disparo se dirigiría hacia otro objetivo o lo intentaría de nuevo. Si se disparase contra un proyectil, avión o nave espacial el haz probablemente abriría un boquete en la superficie del mismo de donde emanaría humo. Sería difícil fallar, pero, en algunos casos, no se lograría destruir el objetivo si no se mantuviese el haz en el mismo punto durante el tiempo necesario o no se localizasen los lugares vulnerables del objetivo.

No esperemos que aparezcan brillantes destellos en el aire o en el espacio cuando entremos en el maravilloso mundo de la guerra de los láseres. Los de la primera generación emitirán probablemente haces infrarrojos invisibles y sólo manifestarán su presencia gracias a la incandescencia que producirán sobre los objetivos o al quemar partículas de polvo que se interpongan en su camino. Puede que la difusión atmosférica permita que el haz sea visible cerca de la superficie de la tierra, pero no en el espacio exterior. A no ser que se desencadene una batalla en algún rincón sumamente polvoriento de la galaxia, no se verá haz alguno; tan sólo algunos destellos reflejados por los objetivos o, en los casos en que el haz sea lo suficientemente intenso, el objetivo incandescente. La destrucción del objetivo sólo sería evidente cuando estallase el depósito de combustible; y ciertos disparos provocarían escapes de agua o aire en el caso de perforar un tanque, pero no serían necesariamente fatales.

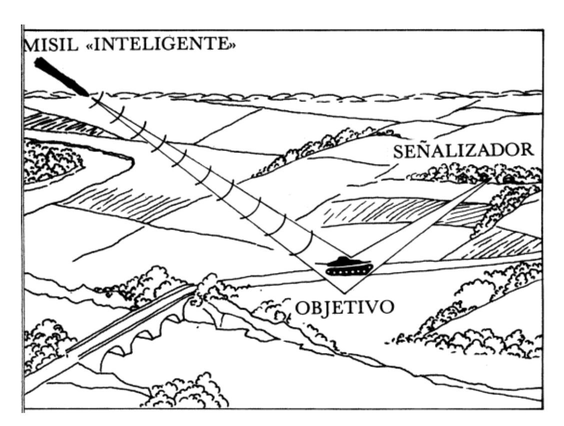
Si se diseñase un láser bélico para ser controlado por seres humanos, en lugar de por circuitos electrónicos —y los humanos suelen ser participantes inevitables de todo los dramas—, es probable que emitiese un haz infrarrojo de alta potencia y otro visible de baja potencia para poder dirigir el disparo. El operador se serviría del de baja potencia para localizar el objetivo deseado y entonces apretaría el gatillo, pulsaría el botón, o haría lo que fuese necesario para disparar el haz de alta potencia.

Puede que sea muy emocionante, pero no tan espectacular ni tan ruidoso como en las películas, ni siquiera como en los juegos de «marcianitos».

LA GUERRA ELECTRO-ÓPTICA

Hasta ahora hemos hablado de los láseres como armas, y, sin embargo, éstos han revolucionado ya las técnicas bélicas en su calidad de accesorios del armamento convencional. Nos referimos a los láseres de baja potencia que se han convertido en una de las herramientas importantes para el campo de batalla electrónico, uno de esos instrumentos que los militares guardan en sus arsenales.

Ahora las batallas se diferencian enormemente de las de hace veinte o treinta años. Los soldados ya no dependen de la luz de la luna para ver durante la noche, ahora disponen de mirillas infrarrojas capaces de «ver» el calor del cuerpo e intensificadores de imagen que amplifican pequeñas cantidades de luz. Los artilleros ya no utilizan telémetros láser para medir la distancia a la que se encuentran los objetivos e instrumentos computarizados que controlan el disparo. Las bombas ya no se dejan caer desde los aviones con la esperanza de que alcancen el objetivo deseado, sino que se dirigen a un punto determinado iluminado por un señalizador láser.



9. El soldado que utiliza el señalizador láser se esconde en un lugar seguro (en este caso entre los árboles de un cerro) y dirige el haz hacia el objetivo (en este caso un tanque). Un «misil inteligente» (o una bomba) puede entonces dirigirse automáticamente hacia el objetivo.

Una buena parte de dichos aparatos reciben el calificativo de electroópticos, debido a que perciben información en forma de luz, infrarroja o visible. Y mientras que algunos de esos aparatos se limitan a facilitar a los servidores de las armas la información que necesitan para utilizarlas

con provecho, otros pasan esa información a determinados ordenadores que disparan y dirigen armas y cohetes sin intervención humana.

El láser se utilizó por primera vez en un campo de batalla en 1972 con la introducción en Vietnam de las primeras bombas «inteligentes» dirigidas por láser. Para que esas bombas alcancen su objetivo, un soldado en tierra lo «ilumina» con un láser de baja potencia (véase el diagrama n.° 9), y un sensor acoplado a las bombas detecta el punto «iluminado» y durante su caída las dirige hacia el blanco. No es necesario que el hombre a cuyo cargo corra esa señalización se encuentre cerca del blanco, y evidentemente es preferible que así no sea puesto que aquél será el lugar donde estalle la bomba. Lo único que precisa es poder vislumbrarlo desde el suelo o desde el aire.

Los primeros láseres utilizados como señalizadores fueron de rubí, semejantes al primero que construyó Theodore Maiman. Si bien en los arsenales todavía se conservan algunos, en general han sido superados por los sintéticos de YAG y neodimio. El problema principal de los de rubí consiste en que además de que la frecuencia de sus pulsaciones no puede ser muy grande, emiten un haz de color rojo claramente visible y cuando el enemigo lo percibe en su vecindad no le es difícil imaginar lo que está a punto de ocurrir. Sin embargo, los láseres de YAG emiten un haz de luz en la región del infrarrojo cercano que es invisible para el hombre, pero fácilmente detectable para los sensores electrónicos y además pueden ser pulsados con mayor frecuencia que los de rubí.

Las propias bombas son, por lo general, convencionales, es decir, no nucleares, y están dotadas de un equipo buscador, de láser, que consiste en un simple detector de luz electrónico, ajustado para que perciba exclusivamente la longitud de onda del láser.

En su forma más simple está dividido en cuatro cuadrantes. Si la dirección es incorrecta, uno de los cuadrantes se ilumina con mayor intensidad que los demás y con dicha información se realizan los ajustes necesarios para corregir su rumbo.

El equipo detector que se adosa a las bombas es relativamente barato: inicialmente costaba unos 2.500 dólares; sin embargo, debido a la inflación y a ciertos perfeccionamientos, hoy su precio ha aumentado. Las Fuerzas Aéreas consideran que las bombas inteligentes son sumamente eficaces y aseguran que con una de ellas se pueden conseguir los mismos resultados que con cien bombas convencionales y a un diez por ciento de

su coste. (No obstante, si examinamos cuidadosamente las cifras mencionadas descubriremos que el precio de una bomba inteligente es diez veces superior al de las ordinarias.)

El ámbito del señalizador-buscador láser se ha extendido mucho más allá de su uso en los bombardeos aéreos. Existe en la actualidad una nueva generación de obuses de artillería y proyectiles de corto alcance capaces de localizar el objetivo con la ayuda de dicho artilugio. El ejército de los EE.UU. dispone de unos obuses para cañón denominados Gopperhead y de unos proyectiles de corto alcance llamados Hellfire (que se lanzan desde un tanque) y que utilizan este sistema de localización. La Marina cuenta también con proyectiles dirigidos por láser y bombas semejantes a las de las Fuerzas Aéreas norteamericanas.

TELÉMETROS Y CONTROLADORES DE TIRO

Los telémetros láser determinan la distancia a la que se encuentra el objetivo midiendo el tiempo que tarda una pulsación en hacer el recorrido de ida y vuelta. Dichos telémetros pueden ser portátiles y casi tan pequeños como unos prismáticos, o pueden formar parte del voluminoso sistema de control de tiro utilizado por los tanques.

Los telémetros tienen su importancia incluso para los proyectiles y bombas dirigidos por láser, puesto que los detectores utilizados por éstos últimos sólo son capaces de realizar pequeños ajustes. Es esencial que el proyectil haya sido lanzado en la dirección adecuada ya que de otro modo no llegará a detectar el punto del objetivo designado por el láser. La información procedente del telémetro puede ser recibida directamente por los circuitos electrónicos del sistema de control de tiro, o transferida por un soldado a otro que se ocupe de realizar el disparo.

RADAR LÁSER

Otra aplicación de los láseres consiste en utilizarlos como una especie de radar para facilitar a los soldados una imagen de parte del campo de batalla. Con la ayuda de láseres de dióxido de carbono que emiten haces infrarrojos pueden llegar a identificarse tanques y otros objetivos enemigos.

También cabe la posibilidad de que el láser permita distinguir a los amigos de los enemigos; en el caso de los tanques, por ejemplo, diferenciaría las vibraciones características de un modelo propio de las del adversario. Otra posibilidad podría consistir en que el haz activase un dispositivo del que estuviesen dotados los tanques y otros objetos del mismo bando, y gracias al cual se los identificaría.

El radar láser se utiliza actualmente para medir concentraciones de contaminantes atmosféricos en la vida civil. Sin embargo, al ejército no sólo le interesan los contaminantes ordinarios sino los que un observador ha calificado de «muy especiales», refiriéndose a agentes químico-bélicos y humos especiales que podrían ser utilizados contra los propios láseres u otros equipos electro-ópticos.

CONTRAMEDIDAS Y CONTRA-CONTRAMEDIDAS

Al igual que existen medidas contra los láseres de alta potencia, también las hay contra los de baja potencia. El primer nivel consiste en la simple habilidad de detectar que el objetivo ha sido iluminado por un láser, lo que evidentemente preconiza un inminente ataque.

El segundo nivel consiste en localizar la fuente del haz y atacar antes de ser atacado. Ambas contramedidas han sido demostradas pero se encuentran todavía en estado de perfeccionamiento. Algunas fuentes militares han expresado la opinión de que dichas contramedidas pueden llegar a resultar más caras que los artefactos que protejan, sin atribuirles (como es de suponer) ningún precio determinado a los soldados.

Evidentemente los militares se preocupan también de las contra-contramedidas, es decir, formas de contrarrestar las contramedidas del contrincante. Una de sus soluciones consistiría en utilizar un láser de longitud de onda variable. El éxito de dicho procedimiento se basaría en que las medidas antiláser dependen de que se conozca la longitud de onda utilizada, de forma que sean insensibles a la luz solar y sin embargo detecten una frecuencia determinada.

FUSILES CON VISORES LÁSER

Los militares han mostrado poca preocupación por perfeccionar con las técnicas láser los sistemas de puntería de los fusiles y, sin embargo, sus posibilidades no han pasado desapercibidas a las instituciones policiales ni a las empresas que les suministran material.

En la actualidad, existen varias compañías que venden fusiles dotados de visores láser, o que suministran dichos visores para ser acoplados a modelos más antiguos. Entre sus clientes se encuentran el FBI, varios departamentos de la policía de Estados Unidos, y otras organizaciones policiales de otros países.

La idea es sencilla. Se acopla un láser de helio-neón al fusil de forma que la dirección de su haz coincida con la del cañón. Cuando se conecta el láser aparece un punto rojo en el lugar donde la bala haría su impacto si se produjese un disparo, sin que para ello sea siquiera necesario mirar a lo largo del cañón del fusil sino tan sólo dirigir el punto rojo al lugar deseado. Dicho sistema puede ser de gran utilidad a los agentes y policías cuando no dispongan del tiempo necesario para apuntar sus armas cuidadosamente. En círculos oficiales también se cree que el punto rojo puede ser sumamente eficaz para convencer a ciertos individuos que se resistan a ser detenidos, al «comprobar» que se encuentran en la línea de fuego de la policía.

BATALLAS SIMULADAS

Una variante de dicho sistema puede utilizarse para los «juegos bélicos». Hasta estos momentos, para llevar la cuenta de heridos potenciales en las maniobras militares era preciso recorrer al campo de referencias humanas, eminentemente subjetivas. Con el fin de solventar dicho problema, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos ha decidido invertir unos 100 millones de dólares en el MILES, un sistema modular de láser integrado de tiro que será utilizado por unos 40.000 soldados y 6 000 tanques, aproximadamente.

El MILES está basado en un concepto sencillo, aunque ingenioso. En lugar de balas, los soldados se lanzarán unos a otros pulsaciones luminosas. Todas las armas, incluso las de artillería, estarán dotadas de pequeños láseres semiconductores capaces de emitir una serie de pulsaciones

codificadas de baja potencia cuando sean disparadas durante el transcurso de algunas maniobras. Gracias al código utilizado se podrá identificar el arma de donde proceda el disparo, lo que es de suma importancia, ya que ciertos objetivos ofrecen mayor resistencia que otros al ataque de determinadas armas. Sería absurdo, por ejemplo, pensar que con disparos de fusil se lograría destruir un tanque, y, sin embargo, es evidente que una granada de artillería aniquilaría a un soldado.

Durante el transcurso de las batallas imaginarias, ciertos sensores con que estarán equipados los hombres y los vehículos determinarán si han recibido algún impacto. Si el sensor detectase los impulsos luminosos adecuados comunicaría a los hombres lo ocurrido y su láser quedaría inutilizado. En el caso de los tanques, la tripulación sería advertida de lo sucedido y se desprendería humo violáceo para dar a conocer a los demás la destrucción del vehículo. Dichos sensores estarán además conectados entre sí, de forma que sigan automáticamente el progreso de la batalla y lleven la cuenta de las bajas sufridas.

El sistema norteamericano fabricado por el departamento electroóptico de la Xerox Corporation en Pasadena, California, no es el único. Existe una empresa británica que desde hace varios años fabrica y distribuye sistemas similares a los ejércitos de numerosos países.

Cabe destacar que dichas batallas imaginarias deben ser controladas por un árbitro con el fin de que los soldados no se invulnerabilicen cubriendo sus sensores.

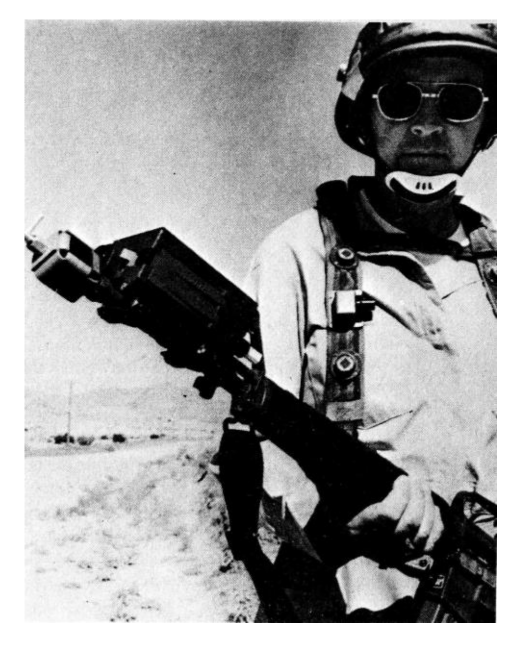
OTROS LÁSERES BÉLICOS

También es factible utilizar los láseres en las comunicaciones militares. Uno de los proyectos consiste en servirse de satélites y láseres para comunicarse con submarinos sumergidos portadores de proyectiles estratégicos.

Dichos sumergibles se encuentran relativamente a salvo mientras no emerjan a la superficie, pero en tales circunstancias es difícil comunicarse con los mismos. Los planes originales para la utilización de ondas de radio de gran longitud tuvieron que ser abandonados debido a problemas de orden ambiental y político basados en la enorme extensión de terreno

necesario para la instalación de las antenas emisoras y ciertas dudas relacionadas con los peligros de sus radiaciones para la salud humana.

Como alternativa, el Departamento de defensa patrocina el perfeccionamiento de láseres que emitan haces de luz verde azulada que es el color que con mayor facilidad se transmite a través del agua del mar. Una posible solución sería la de instalar el láser en un satélite que escudriñase las zonas oceánicas donde se creyese que se encontraban los submarinos. Otra, instalar el láser sobre la superficie de la tierra y dirigir su haz a un espejo acoplado al satélite de forma que éste lo reflejase hacia el mar. Sin embargo, el haz no se mantendría jamás dirigido hacia un solo sumergible con el fin de no delatar su posición, a pesar de lo cual lograría en teoría transmitirle suficiente información. La dificultad está en perfeccionar láseres y detectores adecuados.



Este soldado tiene en sus manos un fusil M-16, para ejercicios sin fuego real. El fusil está dotado de un pequeño láser pulsado, cuyo haz dirige contra sus «enemigos» durante las maniobras. Sandia Laboratories

Los militares no dejan tampoco de descubrir nuevas aplicaciones para las fibras ópticas. Su pequeño tamaño y reducido peso son factores decisivos en el diseño de sistemas de comunicaciones portátiles para el cam-

po de batalla. No les afectan los ruidos electromagnéticos que interfieren en otros sistemas de comunicación, ni emiten ondas de radio que puedan delatar su presencia, gracias a lo cual se evita que el enemigo sintonice las conversaciones y que los proyectiles dirigidos sean atraídos por la fuente emisora.

8. FABRICAR CON LASER. LOS LÁSERES EN LA INDUSTRIA

Cuando los láseres eran todavía jóvenes se les denominó «una solución en busca de un problema». Actualmente la solución ha descubierto numerosos problemas en la industria. En fábricas del mundo entero se utilizan para labores tan dispares como la perforación de diamantes o la de tetillas de biberón, cortar planchas de titanio para los aviones militares o piezas de tela para la confección de trajes. Los ingenieros también han descubierto que *no* se pueden utilizar para algunas tareas, como cortar pescado o segar el césped.

Nos parece oportuno aclarar que en este capítulo nos ocupamos exclusivamente de una faceta de la aplicación de los láseres en la industria denominada *elaboración de materiales.* Se trata de un término deliberadamente ambiguo que incluye todo proceso a través del cual se alteren las dimensiones o las características físicas de un objeto. Evidentemente constituye una parte importante de la industria, pero no su totalidad. En todo proceso industrial es preciso además tomar medidas e inspeccionar los productos, y el próximo capítulo trata de la forma en que los láseres pueden realizar estas últimas tareas.

El éxito de los láseres industriales comenzó a principios de los años 60. Richard Barber, ingeniero de aplicaciones de Photon Sources Inc de Livonia, Michigan, fabricantes de láseres industriales de dióxido de carbono, lo definió en pocas palabras de la siguiente forma:

> En el año 1962, para la primera manipulación de materiales realizada jamás con un láser se utilizó un modelo embriónico de rubí. La técnica era simple, consistía en colocar una lente frente al haz de luz, enfocarlo sobre una hoja de afeitar y taladrarla. En realidad la potencia de los láseres primitivos se medía en gillettes, según el número de hojas que lograsen agujerear de una vez. ¡Evidentemente no tardó en popularizarse el hecho de que los láseres eran capaces de vaporizar y taladrar cuanto se les pusiese por delante! Superada esa euforia inicial, cuando la nube de confusionismo acabó por desvanecerse, los ingenieros y los científicos comenzaron a formularse y a responderse ciertas preguntas de orden práctico: ¿Cuál sería el tamaño del agujero? ¿Con qué velocidad se perforaría? ¿Cuál sería el grosor, la consistencia y la forma del material? Las respuestas decepcionaron a mucha gente y en 1966 el

número de aplicaciones industriales para las que se creyó que se podía utilizar el láser como herramienta perforadora quedó muy reducido.

Definir el problema fundamental es sencillo, pero su solución es mucho más difícil; es frecuente que lo que se haya realizado con éxito en el laboratorio no se pueda aplicar con rentabilidad a la industria. El láser puede no ofrecer las garantías necesarias para formar parte de una cadena de montaje donde deba perforar, cortar o soldar cada vez que pase por delante de él una determinada pieza a lo largo del día. Cabe la posibilidad de que otra técnica resulte más barata, o de que el agujero (o soldadura, etc.) no se ajuste a las instrucciones.

No obstante el láser ofrece ciertas ventajas muy considerables que han servido de motivación a los técnicos en su afán por descubrir cómo utilizarlas. Uno de sus atributos consiste en no tener que entrar en contacto con la pieza con la que se trabaje, y por consiguiente poder despreocuparse de la limpieza, y de la posible rotura de hojas, taladros, etc. Así pues su atractivo es considerable cuando se trata de perforar diminutos agujeros (debido a la inevitable poca resistencia de los taladros de reducido diámetro) o cortar perfiles excesivamente complejos para las hojas convencionales. Gracias a la carencia de contacto físico son también de gran utilidad para trabajar con materiales excesivamente duros o quebradizos, por ejemplo cerámica e incluso diamantes, o blandos y fácilmente deformables como la goma. El láser tiene la propiedad de concentrar la energía con toda precisión en un diminuto punto sin afectar prácticamente en absoluto la zona circundante y además su haz puede llegar a ciertos lugares que de otro modo serían inaccesibles, lo que permite que se lleven a cabo tareas de gran minuciosidad, como las descritas en el capítulo dedicado a la cirugía. Otra faceta importante es el hecho de que sea compatible con los controles de las computadoras, cuyo uso se generaliza de día en día en las industrias progresivamente automatizadas.

Sus desventajas son también considerables. Como es de suponer, una de ellas es su precio. Los instrumentos con suficiente potencia para ser utilizados en la industria son muy caros. El coste de un modesto láser perforador que emita pulsaciones puede exceder fácilmente los 10.000 dólares, y el de un aparato de alta potencia capaz de emitir un haz continuo para cortar o soldar gruesas planchas metálicas es probable que sea superior al medio millón de dólares. Los láseres se encuentran pues entre las herramientas más caras utilizadas en la industria y, mientras los inge-

nieros dispongan de métodos más baratos, evidentemente preferirán no utilizarlos.

Además, hay funciones para las cuales los láseres son simplemente inadecuados. Por ejemplo, taladrar agujeros de grandes dimensiones. En general al aumentar el tamaño del agujero se precisa una mayor cantidad de energía para perforarlo, con el consiguiente incremento proporcional del coste. Puesto que el precio proporcional de los taladros mecánicos no aumenta al mismo ritmo, su uso es más atractivo cuanto mayores deban ser los agujeros.

Existe también un sutil factor sicológico. Los técnicos acostumbran a ser intrínsecamente conservadores y prefieren seguir utilizando procedimientos conocidos mientras los nuevos métodos no ofrezcan ventajas considerables. Evidentemente su actitud es racional y comprensible, pero no deja de limitar el uso de los láseres. Además, en algunos casos no han logrado sobrevivir en las austeras condiciones que imperan en el interior de ciertas fábricas, donde el polvo ha logrado contaminar el sistema óptico y las fuertes vibraciones han desajustado su alineamiento.

En el momento de escribir estas líneas calculamos que existen entre 10.000 y 20.000 láseres industriales en funcionamiento en el mundo entero, la mayor parte de los cuales se encuentran en países desarrollados, como Estados Unidos y Japón. Según la revista *Láser Focus*, las ventas de dichos aparatos alcanzaron los 70 millones de dólares en 1980, sin contar las que pudiesen tener lugar en los países comunistas. Dicha cantidad correspondería a unos 2.000 o 3.000 láseres vendidos durante el año en cuestión y presentaría un índice de crecimiento en dólares del 25 por ciento anual. A pesar de que las cifras parezcan extraordinarias cabe destacar que su distribución no es general. La mayoría de los aparatos son adquiridos por grandes empresas cuya especialidad consiste en realizar tareas difíciles para terceros.

¿PARA QUÉ SIRVEN LOS LÁSERES?

Los trabajos realizados por los láseres pueden ser clasificados según la cantidad de energía necesaria para cumplir su cometido. Cortar y perforar son las tareas cuyas exigencias son mayores puesto que se requiere la energía necesaria para volatilizar el material, aunque sólo sea en un

pequeño punto. La potencia para grabar un mensaje, un número codificado o una marca, por ejemplo, el número de serie de una pieza de automóvil, es inferior, puesto que sólo es preciso volatilizar una capa superficial.

Cuando la cantidad de energía depositada es todavía inferior, el material se funde en lugar de volatilizarse. En tal caso, el láser se convierte en un soldador que permite unir dos piezas metálicas entre sí. Para el tratamiento térmico o *templado* de ciertos materiales cuya estructura interna varía con la aplicación de calor, sin llegar a fundirse, se utilizan potencias todavía inferiores. El calentamiento controlado de ciertos aceros, por ejemplo, provoca un endurecimiento de su superficie que contribuye a prolongar su duración.

Tanto los láseres pulsados como los de haz continuo son útiles en la industria. Los que emiten pulsaciones suelen utilizarse para perforar, puesto que ésta es una labor que requiere impulsos breves e intensos de energía. Para soldar y cortar se pueden utilizar ambos métodos y para el tratamiento térmico se acostumbran a usar láseres de haz continuo.

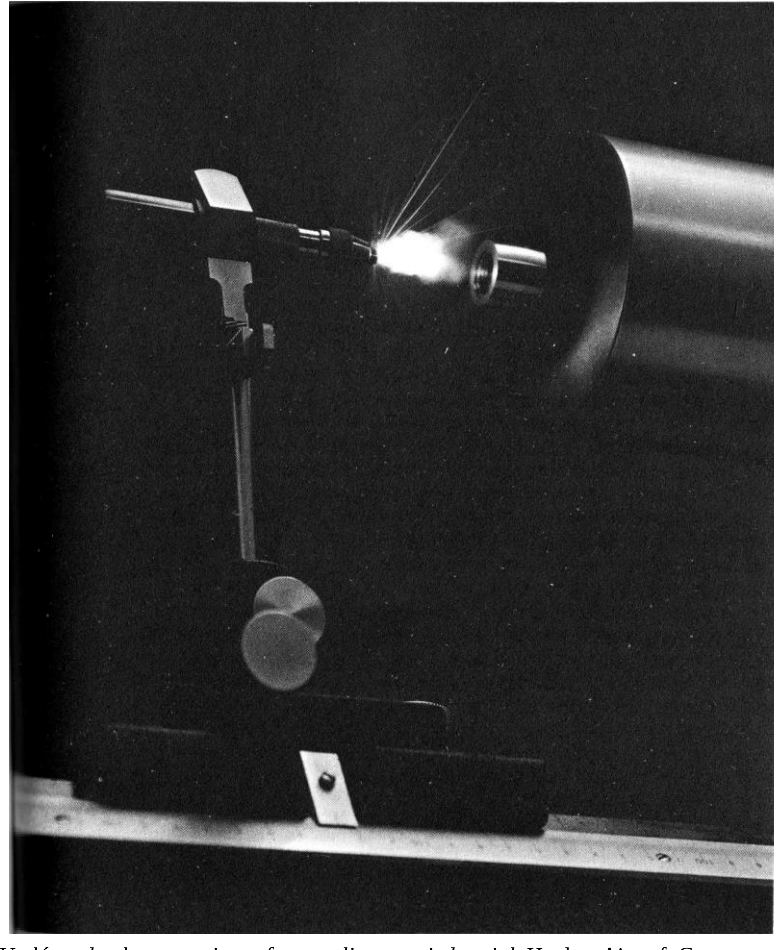
Para la mayoría de las aplicaciones industriales sólo existen cuatro modelos comerciales capaces de generar la potencia necesaria: el de YAG y neodimio, el de cristal de neodimio, el de rubí y el de dióxido de carbono. Tanto el de YAG como el de dióxido de carbono pueden emitir pulsaciones o un haz continuo, mientras que los de rubí y los de cristal sólo emiten pulsaciones. El haz continuo, de mayor potencia se obtiene con el modelo de dióxido de carbono.

PERFORACIÓN DE AGUJEROS

La perforación de diamantes por medio de láseres no es sólo una posibilidad sino una realidad que se consuma continuamente y no se trata de ninguna exhibición para demostrar las proezas de las que son capaces. Puesto que el diamante es el material más duro que se conoce, se utiliza en el proceso de estirado de cables, cuyo calibre y acabado se obtienen al forzar el paso del metal a través de un agujero practicado previamente en un diamante.

Antes de la invención del láser se podían llegar a tardar dos días para taladrar un solo agujero en un diamante. En la actualidad un experto dispara una serie de pulsaciones contra el cristal y en pocos minutos se

logra perforarlo por volatilización. Sin embargo el láser no pule la superficie interior del agujero con la nitidez necesaria para la fabricación del cable, y es preciso que el acabado se realice por procedimientos mecánicos, a pesar de lo cual la operación se lleva a cabo con mucha mayor rapidez que antes.



Un láser de alta potencia perfora un diamante industrial. Hughes Aircraft Company

Otra de sus virtudes es la de que puede perforar la cerámica. La creciente aplicación de este material en la industria electrónica, entre otras, se debe a su rigidez, poco peso, dureza, a su capacidad para soportar altas temperaturas y al hecho de que no conduce la electricidad. Sin embargo, perforar o cortar cerámica no es tarea fácil. Se trata de un material que, además de rígido, es sumamente frágil y puede romperse con gran facilidad. La duración de los taladros utilizados para perforar cerámica es además muy limitada. Otra complicación estriba en que es prácticamente imposible perforar los minúsculos agujeros necesarios para los circuitos microelectrónicos con un taladro mecánico. Pues bien, los láseres son capaces de abrir en piezas de cerámica agujeros cuyo diámetro sea la veinteava parte de su grosor, mientras que los taladros mecánicos suelen romperse a partir del momento en que el espesor de la pieza supera al diámetro del agujero.

Los láseres son particularmente atractivos para el diseño de circuitos debido a que pueden ser programados para que perforen automáticamente una serie de agujeros. Lo único que debe hacer el operador es proporcionarle el material necesario, puesto que cuando se le ha facilitado la información indispensable no precisa otra intervención humana.

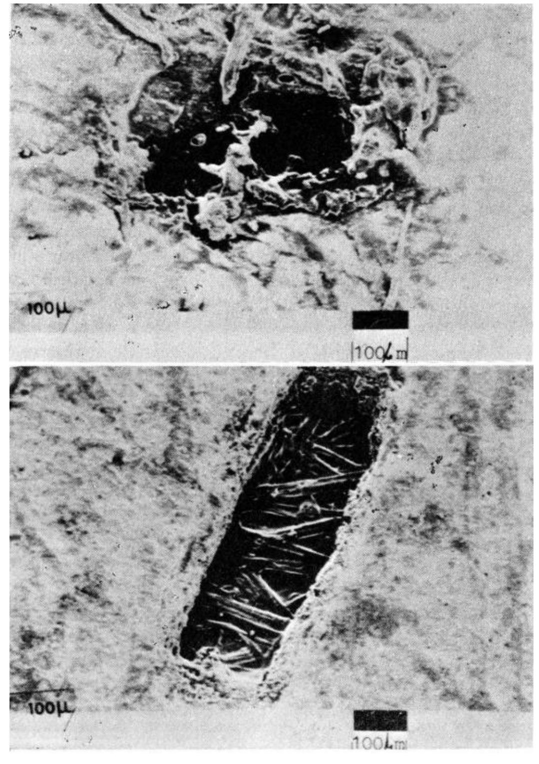
Las líneas de agujeros perforados sobre las piezas de cerámica tienen también otra utilidad: la de permitir que se rompan con nitidez. Para ello, los agujeros deben perforar las piezas sólo en parte, y siempre en línea recta, de forma que, al doblarlas, se rompan a lo largo de la «línea punteada». Este es sin duda el sistema más limpio de romper la loza en pedazos.

AGUJEROS EN MATERIALES BLANDOS

La goma y los plásticos, que en la escala de dureza se encuentran en el extremo opuesto al de la cerámica y los diamantes, también pueden ser perforados por láser. Las técnicas convencionales de moldes y taladros funcionan perfectamente para agujeros de grandes dimensiones, pero no para los diminutos.

Desde la mitad de la década de los sesenta se utilizan los láseres de dióxido de carbono para perforar tetillas de biberón.

Su consumo es de unos meros 15 vatios por agujero y la parte más difícil de la operación ha consistido en diseñar un sistema que permita el paso de las tetillas con suficiente rapidez. En la actualidad se consigue fácilmente una tetilla por segundo y sus agujeros son mucho más uniformes que los obtenidos por procedimientos mecánicos.



Agujeros perforados en papel de cigarrillos: con medios mecánicos (arriba) y con láser (abajo). Evidentemente, el del láser es de mucha mayor precisión. Coherent Inc

Incluso en las casas donde no haya ningún bebé es probable que se encuentren objetos perforados por láser, como por ejemplo las válvulas de los aerosoles. Mientras se utilizaron fluorocarbonos en dichos recipientes, los agujeros de sus válvulas eran relativamente grandes, pero a

partir del momento en que la gente comenzó a preocuparse por la posible reducción de la capa ozónica de la atmósfera y empezó a abandonarse el uso de dichos productos, los técnicos tuvieron que enfrentarse a un nuevo problema. Los agujeros de las válvulas necesarias para la utilización de otros agentes propulsores deben ser de un diámetro muy inferior, entre 0,15 y 1 mm.

Resultaba difícil construir las nuevas piezas de plástico con sus pequeños orificios por los procedimientos convencionales: una operación de moldeado con pequeñas puntas metálicas para lograr los agujeros. Evidentemente, cuanto más pequeño sea el agujero mayor será la probabilidad de que se rompa la punta metálica, por lo que los técnicos decidieron servirse de láseres. El haz de un modelo de dióxido de carbono con una potencia entre 50 y 185 vatios es capaz de perforar los orificios en cuestión en el espacio de 0,001 a 0,050 segundos. Con dos cadenas de montaje alrededor del láser se pueden llegar a producir entre 600 y 700 válvulas por minuto. Por consiguiente, al láser se le puede atribuir también el mérito, quizás un tanto dudoso, de haber contribuido a la salvación de los aerosoles.

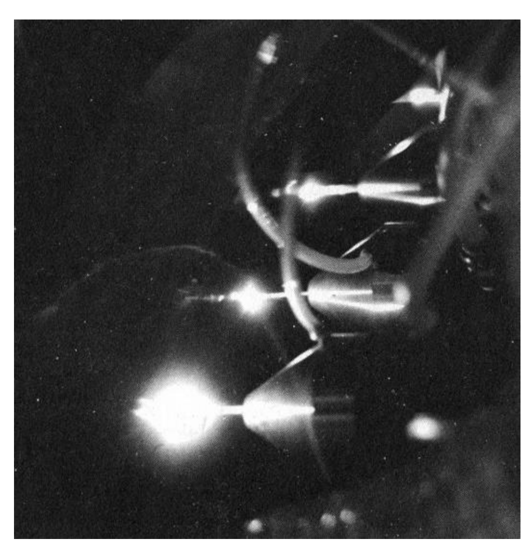
Los orificios de las tetillas de biberón o los de las válvulas pulverizado- ras son muy pequeños, pero existen otros todavía más diminutos de los que no solemos ser conscientes a pesar de que se encuentran en productos de uso común. Los láseres, por ejemplo, se usan para perforar minúsculos agujeros en el papel de los cigarrillos. El contenido de alquitrán de los cigarrillos que según la ley vigente en Estados Unidos debe anunciarse con claridad sobre el paquete, depende del flujo de aire a través de los mismos y la perforación por láser con una elevada precisión de diminutos orificios permite que los valores declarados por los fabricantes sean mucho más ajustados. Si se utilizan métodos convencionales de perforación, por ejemplo, la cantidad de alquitrán por cigarrillo puede oscilar entre los 3 y los 9 miligramos, mientras que si se usa un láser el rango de valores será de 5 a 7 mg. Puesto que la ley exige que se declare la cantidad más elevada, en el primero de los casos los fabricantes se ven obligados a anunciar los 9 mg, mientras que en el segundo se considera que el contenido máximo de los cigarrillos es de 7 mg.

Para observar los orificios en cuestión es preciso disponer de un microscopio o de una potente lupa. Su diámetro medio es de unos 0,25 mm y se repiten cada milímetro. La perforación de los mismos se realiza con

la ayuda de un láser de dióxido de carbono, a razón de unos tres millones de orificios por segundo mientras el papel se desplaza frente al haz. Según fuentes de Coherent Inc., de Palo Alto, California, todos los principales suministradores norteamericanos de papel de cigarrillos disponen de un equipo de láser por lo menos, y en algunos casos cuentan incluso con catorce.

Los láseres constituyen también el método más rápido e higiénico para perforar las cápsulas de medicamentos de efectos retardados según la Alza Corporation, de Palo Alto, California. Félix Theeuwes, vicepresidente de investigación y desarrollo de productos, ha afirmado que se perfora un solo orificio de 0,12 a 0,33 mm de diámetro en cada cápsula, según el tiempo que se desee que tarde el cuerpo en absorber un determinado medicamento.

La precisión perforadora del láser es de suma importancia para las cápsulas de medicamentos, puesto que si el agujero es demasiado grande se absorberá el producto con excesiva rapidez y, si peca de lo opuesto, el agua absorbida por la superficie semipermeable de la cápsula quedará retenida en el interior de la misma pudiendo llegar a reventarla.



Un láser de dióxido de carbono de múltiples haces, puede perforar o cortar piezas metálicas. Coherent Inc

DESVENTAJAS DE LA PERFORACIÓN LÁSER

A pesar de que el sistema de perforar por láser puede solucionar numerosos problemas industriales, tampoco está desprovisto de limitaciones. Una de ellas consiste en el elevado coeficiente de reflexión de los metales que puede llegar a ser del 90 por ciento, requiriendo por consiguiente muchísima más potencia. Para que una superficie cuyo coeficiente de reflexión sea del 90% absorba 50 vatios es preciso que la potencia del haz sea de 500 vatios, mientras que si fuese del 10% se conseguirían los mismos resultados con un haz de 56 vatios cuya generación sería más fácil y menos costosa.

El material volatilizado crea también un problema, puesto que no se limita a desaparecer. Si bien por lo general es expulsado del orificio, en parte se condensa alrededor de él para formar una especie de cráter, y es necesario proteger del material evacuado la lente de enfoque. Además, según el material que se utilice, el orificio no es perfecto, puesto que la pequeña parte de material que en lugar de volatilizarse se haya fundido se solidifica nuevamente de forma irregular, causando por consiguiente grietas que lo debilitan.

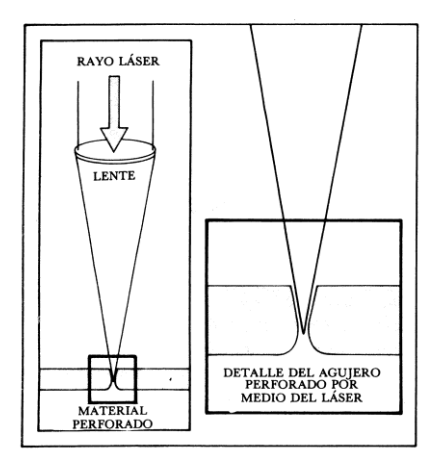
En general, los láseres no perforan orificios perfectamente verticales (véase el diagrama N.° 10) debido a que su haz cónico debe ser focalizado de forma que el vértice se encuentre ligeramente por debajo de la superficie del material: por consiguiente, los agujeros tienden también a ser cónicos. Existen varios métodos para reducir la pendiente de las paredes interiores del orificio, uno de los cuales consiste en utilizar una lente de mayor *distancia focal,* lo que no evita que deban pulirse con el fin de eliminar el material solidificado y mejorar la verticalidad del agujero.

El hecho de que el haz del láser sea cónico limita, también, la proporción entre la longitud del orificio y su diámetro. Cuando se perfora en cerámica, la longitud del orificio puede llegar a ser 25 veces superior a su diámetro, pero en el caso de la mayoría de los metales la proporción máxima suele ser de diez a uno. Los problemas de evacuación del material volatilizado limitan a su vez la profundidad.

EL LÁSER COMO INSTRUMENTO CORTANTE

El láser corta los materiales no metálicos de la misma forma que los perfora, es decir, volatilizándolos. Generalmente se aplica un chorro de gas a la zona que se corta con el fin de eliminar el material volatilizado y evitar que interfiera con la operación de corte o se deposite sobre el sistema óptico y lo estropee. Se acostumbra a utilizar aire o algún gas inerte como el argón, particularmente en los casos en que exista el peligro de incendio o explosión.

En teoría se podría utilizar el mismo procedimiento para los metales, sin embargo su coeficiente de reflexión es tan elevado que sería necesario generar potencias prohibitivas. Existe no obstante una forma sencilla y elegante de evitar dicho problema: dirigir un chorro de gas de forma que coincida con el haz de luz. Cabe destacar que en este caso no se utiliza aire ni un gas inerte, sino oxígeno puro.



10. Una de las desventajas de la perforación por láser es que los agujeros practicados por este medio son más cónicos que cilíndricos. Y la causa se debe a que la lente, al enfocar el rayo láser, le da a éste una forma cónica.

Con este procedimiento, la función del láser no consiste en volatilizar el metal, sino simplemente en calentarlo hasta que alcance la temperatura necesaria para reaccionar con el oxígeno, con lo que se consigue que, al consumirse el metal, se produzca un corte en el material y que el chorro de gas desaloje al mismo tiempo los productos de la reacción. Hablando con el debido rigor, no es el láser el que realiza el corte, sino que contri-

buye a que lo practique el oxígeno consumiendo metal previamente calentado.

Sean cuales fueren los términos utilizados para calificar el procedimiento descrito, el caso es que se trata de una operación verdaderamente espectacular que ha impresionado a mucha gente y de gran utilidad para cortar ciertos metales que se resisten a las técnicas convencionales. Esta ha sido la razón por la que ha despertado el interés de los militares para cortar entre otras cosas las planchas de metal utilizadas para la fabricación de aviones.

Los láseres de dióxido de carbono han sido aceptados como la mejor herramienta para cortar un metal eminentemente problemático; el titanio, que por su dureza y poco peso se utiliza en la construcción de algunos aviones militares. Tal es la dureza de dicho metal que destruye las sierras utilizadas para cortarlo y, dado su elevado coste, conviene realizar la operación con la mayor eficacia posible.

Por suerte, el titanio se corta fácilmente con un láser de dióxido de carbono, debido a que su temperatura de inflamación es relativamente baja y reacciona ávidamente con el oxígeno. Con un láser de 375 vatios, por ejemplo, se pueden cortar planchas de 6 mm de espesor a razón de 250 centímetros por minuto. Además, con dicho procedimiento se realiza un corte mucho más delgado que con una sierra convencional y, por consiguiente, se desperdicia una menor cantidad del valioso metal.

Dentro de este campo, se ha recurrido a los láseres para resolver algunos problemas poco comunes. En el Centro de investigación de tecnologías unidas, por ejemplo, se recurrió al láser para cortar las frágiles planchas metálicas de un buque de la época de la guerra civil norteamericana llamado *USS Monitor*, puesto que con cualquier otro método se habría desmoronado. La operación formaba parte de un estudio de posibilidades destinado a la recuperación del barco que zozobró junto al cabo Hatteras durante una tormenta hace más de un siglo.

CORTE DE CONTRACHAPADOS

Desde principios de los años sesenta mucha gente se ha interesado por la posibilidad de servirse de los láseres para cortar madera, suponiendo que lo lograrían de una forma nítida y rápida, pero en realidad la ma-

yoría de las esperanzas se han transformado en decepciones. Los láseres inevitablemente ofrecen menos ventajas que las herramientas convencionales, como sierras y cuchillas, debido a su elevado coste, la poca profundidad de su corte y la carbonización evidente de las aristas.

Existe sin embargo una notable excepción, que consiste en cortar las matrices del contrachapado por las que se deslizan las cuchillas utilizadas para cortar o doblar el cartón en las fábricas de cajas. Las matrices tradicionales se construyen con listones de madera de arce contrachapada de 19 mm de espesor, y deben ser preparadas con absoluta precisión, de forma que las rendijas por donde se desplazan las cuchillas sean estrechas y verticales, para que el corte coincida exactamente con el dibujo impreso sobre el cartón.

Antes de la aparición de los láseres, las matrices se construían a mano y un artesano solía tardar aproximadamente una semana en fabricar un ejemplar de cierta complejidad. Con un láser de dióxido de carbono de 375 vatios se pueden conseguir idénticos resultados en un solo día. Una computadora controla el corte con una precisión de 0,4 mm por metro longitudinal y, una vez programado, el láser puede repetir la operación tantas veces como sea necesario.

CORTE DE GOMA Y PLÁSTICO

No es fácil cortar goma, puesto que, debido a su manifiesta flexibilidad, puede doblarse y deformarse bajo la presión de la cuchilla. En los casos en que la forma y las dimensiones del corte sean críticas, como por ejemplo cuando se construyen juntas para sistemas de vacío o de alta presión o equipos para control de fluidos, algunos fabricantes recurren a los láseres.

El canto de ciertas juntas de goma debe ser inclinado en lugar de vertical y cortarlas con una cuchilla resulta extremadamente difícil debido a que la propia presión puede distorsionarlas. Sin embargo el láser facilita la operación puesto que se logran los efectos deseados ajustando simplemente el ángulo del haz, sin causar distorsión alguna debido a que no existe contacto físico entre las partes cortada y cortadora. Además la goma absorbe con gran eficacia la luz procedente de los láseres de dióxido de carbono y por tanto el corte se realiza con gran rapidez.

También se utilizan los láseres para cortar plásticos. Resultan particularmente útiles para dividir fibras sintéticas, ya que al mismo tiempo que se cortan y gracias al calor del haz, se aseguran los bordes de las mismas. Buen ejemplo de ello son los cinturones de seguridad de los automóviles, que no sólo se cortan con extrema rapidez, sino que el sellado de sus bordes evita que se deshilen.

CORTE DE TELA

El láser no sustituirá jamás unas tijeras bien afiladas en manos de un sastre o de una modista; sin embargo, se está introduciendo en el mundo textil gracias a la facilidad con que se acopla a los sistemas computarizados destinados a cortar patrones de los rollos de tela.

La clave para cortar tela fue descubierta por el departamento de productos industriales de la Hughes Aircraft Company en Carlsbad, California, y consiste en el control computarizado. Una vez se ha facilitado a la computadora la información relacionada con los patrones deseados, ésta calcula la mejor forma de cortarlos con el fin de desperdiciar la menor cantidad de tela posible. Como es de suponer, no precisa preparar previamente patrones de papel, sino que manipula directamente el láser de dióxido de carbono de forma que su haz se desplace sobre la mesa donde se encuentra la tela. Mientras se realiza el corte, unas bombas de succión incorporadas en la mesa evitan que se mueva el material y al mismo tiempo aspiran el humo resultante de la operación. El procedimiento es limpio y ocasiona un mínimo de carbonización de las fibras que habitualmente se utilizan para confeccionar trajes masculinos.

COMPENSACIÓN DINÁMICA

Todos los automovilistas se habrán hecho equilibrar las ruedas en alguna ocasión. Esta es una operación que también debe realizarse con las ruedas de ciertos tipos de máquinas. El problema estriba en que sólo se detecta el desequilibrio cuando gira la rueda y, sin embargo, para rectificar el defecto es preciso eliminar parte del material de la misma, lo cual con herramientas convencionales no puede realizarse si la rueda gira. Hay que detenerla, trabajar en la corrección del defecto, hacerla girar de

nuevo para comprobar su equilibrio y repetir la operación tantas veces como sea necesario hasta que quede debidamente compensada.

Sin embargo con un láser de YAG y neodimio se puede eliminar el material sobrante sin detener el movimiento rotatorio de la rueda. La operación se realiza haciéndola girar a grandes velocidades hasta localizar la zona cuyo peso es excesivo y entonces se dispara el láser con el fin de que volatilice una pequeña cantidad de material, repitiendo la operación hasta que el equilibrio sea perfecto. En la actualidad sólo se utilizan los láseres para equilibrar ruedas de pequeño tamaño debido a la reducida cantidad de material que son capaces de eliminar por vez.

MARCAS Y GRABADOS

Los láseres se utilizan para grabar códigos, números de serie, marcas y dibujos en varios productos.

En la industria, la forma tradicional utilizada para grabar códigos o números de serie consiste en servirse de algún tipo de punzón, lo cual en el mejor de los casos supone un procedimiento bastante engorroso. Además, debido a la excesiva dureza de ciertos materiales, el punzón no logra causar la impresión deseada y llega incluso a sufrir daños. Por otra parte, resulta difícil automatizar dicho proceso, lo cual supone un grave problema en una industria cuyo fin es el de acelerar sus métodos de producción y que se encuentra sujeta, además, a un creciente número de normas gubernamentales destinadas a mejorar el control de los productos con métodos de codificación más perfeccionados.

El láser puede grabarla superficie de cualquier material, independientemente de su dureza, sin dificultad alguna. Uno de los métodos consiste en utilizar una serie de pulsaciones breves e intensas, de forma que con cada una de ellas se elimine una pequeña cantidad de material, formando un punto sobre la superficie. Si se mueve la pieza adecuadamente, el resultado serán una serie de puntos que equivaldrán a un número de serie codificado. Los láseres utilizados para dichas operaciones pueden ser programados para que graben con gran rapidez un número diferente en cada pieza y prácticamente de cualquier tamaño. Los fabricantes de semiconductores los utilizan para grabar unos números minúsculos sobre las obleas de silicio que más adelante se convertirán en las pastillas de

circuitos integrados, de múltiples aplicaciones en la industria electrónica. Por otra parte, los fabricantes de automóviles se sirven también de ellos para grabar números de serie sobre duras piezas de metal, a veces en lugares*de difícil acceso, con el fin de ayudar a la policía a identificar coches robados.

Existe también otro sistema de grabación por láser en el cual la marca no se inscribe con una serie de puntos, sino con una línea continua. En algunos casos el procedimiento es similar al de grabación convencional, ya que el haz de luz elimina a su paso parte del material de la superficie que puede tratarse de madera o cualquier otro elemento. Pero, en otros, la totalidad del grabado se realiza simultáneamente gracias a un método descubierto por Lumonics Research Inc. de Kanata, Ontario, que consiste en hacer que las pulsaciones de un láser atraviesen una máscara que contiene la imagen que se desea grabar. Un sistema de lentes de enfoque proyecta la imagen del patrón sobre la pieza y la energía del láser elimina el material necesario para formar el grabado. El procedimiento es muy similar al de estarcido y se utiliza con el mismo fin, especialmente en los casos en que el estarcido convencional no funcionaría, como por ejemplo sobre la goma virgen, donde no se adheriría la pintura, o en diminutos componentes electrónicos.

DESGUARNICIÓN DE CABLES POR LÁSER

Los láseres han sido utilizados para desproveer de aislante los cables eléctricos coaxiales formados por un hilo de cobre rodeado de varias capas de material no conductor, un forro metálico y una cubierta de protección de plástico. Cuando se utilizan desnudadores mecánicos convencionales se acostumbra a dañar el forro metálico o la cubierta protectora del cable; sin embargo, con un láser de dióxido de carbono se evitan dichos problemas, ya que los materiales aislantes y el plástico absorben fuertemente el haz, mientras que el metal lo refleja. Esta reflectividad hace que, con el láser, se detenga automáticamente el proceso de desguarnición con mucha mayor eficacia que la debida a la resistencia del metal ante unos desnudadores mecánicos. No obstante, los láseres no son lo suficientemente portátiles para que los técnicos los lleven consigo, por lo que, para reparar cables defectuosos hay que llevar éstos a los talleres.

En la construcción de la nave espacial Columbia se utilizó un láser portátil para la desguarnición de cables. A pesar de que su precio es muy superior al de unos simples alicates, los constructores decidieron utilizarlos, puesto que la seguridad era primordial y ofrecía una garantía absoluta de no causar daño alguno a los hilos metálicos al desnudar los numerosos cables protegidos con aislantes especiales de gran resistencia.

SOLDADOR LÁSER

Para realizar todos los trabajos descritos hasta estos momentos el láser debe volatilizar el material, pero para soldar precisa menos energía, puesto que las dos piezas —generalmente de metal— sólo deben llegar a fundirse lo suficiente para que cuando se solidifiquen de nuevo formen una unión. La volatilización no sólo no es necesaria, sino que es perjudicial, ya que, si llega a producirse durante el proceso de soldadura, puede producir burbujas que agrieten la unión y provoquen su rotura.

El láser ofrece ciertas ventajas con relación a las soldaduras convencionales autógena o eléctrica. Por una parte, no precisa que la atmósfera en la que se desarrolle sea especial, puede tratarse de aire corriente, una entre muchas combinaciones de gases especiales o incluso el vacío. Además, puesto que no es necesario que haya contacto físico alguno, el haz puede soldar a través del cristal —por ejemplo en el inferior de un tubo hermético— sin perjudicar el recipiente.

Para soldar se pueden utilizar láseres pulsados o de haz continuo, ya sean de rubí, cristal de neodimio, YAG y neodimio o dióxido de carbono. Cuando se utilizan pulsaciones, éstas suelen ser de mayor duración que las usadas para perforar o cortar, con el fin de evacuar la energía en el tiempo y en el espacio para evitar la volatilización del material que debilitaría la soldadura. No obstante, cierta volatilización superficial es inevitable y, para eliminar el vapor producido, se acostumbra a utilizar un chorro de gas inerte en la zona donde se practica la soldadura. Los láseres que producen un haz continuo, en particular los de dióxido de carbono, son los más idóneos para soldar, especialmente las planchas metálicas gruesas.

SOLDADURA DE PLANCHAS GRUESAS

Las planchas más gruesas que según la información divulgada han sido soldadas hasta ahora, han sido de acero inoxidable u otros tipos de acero con un espesor de 50 mm. Dichas soldaduras se realizaron a razón de 1,3 m por minuto con un láser (dinámico) de dióxido de carbono de 77 kilovatios, perteneciente a los laboratorios de investigación naval (NRL).

El aparato del que se sirvieron no es exactamente un modelo de uso industrial, sino un láser construido para realizar pruebas bélicas, capaz de emitir 100 kilovatios durante unos escasos segundos. (Los láseres industriales de mayor potencia con haz continuo son también de dióxido de carbono, pero su emisión máxima es de unos 15 a 20 kilovatios.) «Jamás se utilizarán equipos como éste en la industria», declaró Conrad Banas del Centro de investigación de tecnologías unidas de East Hartford, Connecticut, que fue quien realizó dichas pruebas en 1976. Sin embargo no cabe duda de que ha quedado demostrada la posibilidad de perfeccionar los láseres de alta potencia para usos industriales.

Las soldaduras se realizan con mayor rapidez cuando las planchas son más delgadas, habiéndose logrado velocidades de 50 mm por segundo con un haz de 90 kilovatios generado por un láser de los NRL. Este se utilizó para soldar una plancha de acero de 40 mm de espesor. Dichas soldaduras no cumplían las condiciones establecidas por las rigurosas normas de la Marina norteamericana para la construcción de buques, pero tampoco se esperaba que lo hiciesen, debido a que se trataba de un primer experimento de esta índole con láseres de alta potencia.

Los astilleros de la armada, cuyo propósito es el de soldar planchas de acero de grandes dimensiones para la construcción de buques y submarinos, quedaron tan impresionados con los resultados que prepararon en seguida otras pruebas, y mandaron instalar un láser de dióxido de carbono, capaz de producir un haz continuo de 25 kilovatios, en una factoría militar de Minneapolis que la FMC lleva para la Marina. Entre otras, la meta que se proponen ahora es soldar las planchas de acero de 40 mm de espesor (y las de 19 mm de acero reforzado) a una velocidad superior a 760 mm por minuto.

En otros lugares, se estudia también la posibilidad de utilizar para los trabajos de soldadura láseres de dióxido de carbono de alta potencia (que suelen definirse como los que pueden generar continuamente un mínimo

de 2 kilovatios). Avco Everett Laboratory Inc., de Everett, y su subsidiaria metalúrgica de Somerville, ambas en Massachusetts, han construido varios láseres capaces de generar entre 10 y 15 kilovatios y se proponen fabricar otros modelos que puedan operar día y noche en las cadenas de montaje. Los prototipos originales se utilizan actualmente con fines de investigación en ciertos lugares, como el centro técnico de la General Motors, el centro de investigación de la IIT en Chicago, la fábrica italiana de automóviles Fiat y otros centros italianos de investigación. La Ford ha realizado también pruebas con un láser de dióxido de carbono de muchos kilovatios facilitado por Tecnologías unidas para soldar los chasis de los automóviles. Quizá la gama más amplia de aplicaciones sea la que estudia el instituto de investigación IIT que recibe contratos de numerosas empresas y agencias gubernamentales. Uno de los aspectos que se sigue con mayor interés es el de la soldadura del cobre, operación difícil por cualquier otro medio.

Según un estudio realizado por el Centro de investigación de tecnología para la Asociación internacional de investigación sobre el cobre, de Nueva York, la posibilidad de soldar aleaciones de cobre y níquel podría ser altamente rentable para las compañías navieras. Al presentar dicha aleación una superficie mucho más lisa que la del acero utilizado habitualmente para la construcción de los cascos de los buques mercantes, los navíos fabricados con este material ofrecerían menor resistencia al agua. Y a tales casos no podrían adherirse los percebes, que contribuyen a que aumente tanto el peso como la resistencia de los buques. Según L. McDonald Schetky, director técnico de investigación metalúrgica de la Asociación internacional de investigación del cobre, con una inversión de 3,5 millones de dólares (para cubrir enteramente un buque de 200 metros de eslora con la mencionada aleación) podrían ahorrarse 60 millones de dólares a lo largo de los veinte años de la vida del barco, gracias al menor consumo de combustible, la reducida cuantía de las reparaciones y el mayor número de desplazamientos anuales que podría realizar por su mayor velocidad.

A pesar del interés que han despertado los láseres de muchos kilovatios en los problemas de las soldaduras industriales, sólo se utilizan en dos cadenas de montaje: la del Departamento de baterías industriales de la Gould Inc., en Fort Smith, Arkansas y la de la C & D Batteries, perteneciente a la Eltra Corporation de Leola, Pennsylvania. En ambos casos

se utilizan para soldar las baterías de plomo y ácido que dichas empresas suministran a la Western Electric, rama industrial de Bell Telephone System.

Las baterías en cuestión fueron diseñadas por la Western Electric con las tolerancias adecuadas para poder soldarlas con láser. Con el fin de que las soldaduras realizadas por dicho método cumplan los requisitos necesarios es preciso que las uniones estén ajustadas con una gran precisión, puesto que con el proceso de soldadura por láser no se podrían llenar las separaciones demasiado grandes que existiesen entre ambas planchas. Durante los tres primeros años de funcionamiento se han realizado un total de 10 millones de soldaduras en unas 100.000 baterías. Aunque la cifra pueda parecer impresionante, se trata de una cantidad relativamente modesta en este campo; los técnicos, sin embargo, afirman que lo reducido de la producción es precisamente lo que contribuye a que las soldaduras por láser sean factibles.

SOLDADURAS DE BAJA POTENCIA

La altas potencias son espectaculares, pero no son necesarias para soldar planchas metálicas relativamente delgadas, y ha sido precisamente en el campo de las bajas potencias donde se han conseguido los mayores éxitos.

La soldadura convencional es un proceso muy complejo y sólo puede practicarlo un soldador especializado; sin embargo, con un láser el trabajo es muy sencillo. Según Simón L. Engel, presidente de la HDE Systems, California (empresa especializada en el tratamiento de materiales con láser para otras industrias) «con el mismo montaje óptico, los mismos inyectores de gas y las mismas medidas protectoras se pueden tratar la mayoría de los metales desde el más duro acero hasta las aleaciones de circonio, sin tener que preocuparse por electrodos, ligas, varillas, terminales, polaridades, etc. para ajustarse a las necesidades de cada tarea».

Por consiguiente, en muchas cadenas de montaje se encuentran láseres de rubí, cristal de neodimio, YAG y neodimio y dióxido de carbono con una potencia continua o promediada (en los láseres pulsados) de 1 kilovatio a lo sumo. Entre las muchísimas piezas soldadas por dicho procedimiento se encuentran las baterías utilizadas para los marcapasos

cardíacos (cuyo hermetismo es esencial), puentes ortodónticos, conexiones eléctricas defectuosas en el interior de recipientes herméticos, e incluso electrodos de níquel para bujías de automóvil.

EL SOLDADOR LÁSER Y LA MICROELECTRÓNICA

Otra aplicación del láser es la de emplearlo para soldar diminutos componentes. Evidentemente, no reemplazará al soldador convencional en los pequeños talleres, ni siquiera en los de los más ardientes entusiastas del invento, pero con él se pueden solucionar los problemas debidos a la creciente miniaturización de las computadoras.

En la fabricación de computadoras modernas es necesario realizar un sinfín de conexiones entre sus diminutos componentes, lo que presenta un grave problema, dada la constante reducción en el tamaño de estas piezas y el minúsculo espacio que las separa. En tales condiciones, sólo un «enanito» lograría practicar las soldaduras necesarias.

La empresa Apollo Lasers, de Los Angeles, ha vendido más de 35 equipos de soldadura electrónica láser, por un total de casi un millón de dólares, en el transcurso de un solo año. Dichos equipos constan de un pequeño láser pulsado de dióxido de carbono que efectúa 40 soldaduras por segundo en circuitos donde pueden llegar a haber 25 conexiones por centímetro cuadrado.

Según Fred Burns, presidente de Apollo, dicho procedimiento permite que las soldaduras se lleguen a realizar a una velocidad hasta diez veces superior a la del método manual. Además, ofrece mejores garantías de calidad puesto que aplica siempre la misma cantidad de energía (normalmente dos julios) en cada conexión, lo cual no lograría ni aun el más experto de los técnicos con un soldador convencional. Otra ventaja consiste en que, con cables barnizados (en lugar de protegidos por tubos de plástico), el láser volatiliza el material aislante y suelda a la vez, en una misma pulsación.

TRATAMIENTO TÉRMICO

Con el fin de comprender el procedimiento denominado tratamiento térmico —o «transformación endurecedora»— de los metales se impone

una breve explicación sobre la estructura de los cuerpos sólidos. Los metales, al igual que muchos otros materiales, pueden existir en varios estados sólidos en cada uno de los cuales su estructura interna es diferente. Las diferencias principales entre los diversos estados corresponden al orden interno de los átomos. El estado de un sólido depende de la temperatura y presión a las que fue sometido durante su formación, así como de todo lo que le haya ocurrido a partir de aquel momento.

El ejemplo más familiar lo constituye el carbono que en condiciones normales forma grafito, es decir un material de poca consistencia negro y blando. Sin embargo sometido a presiones sumamente altas se convierte en diamante, el material más duro entre todos los conocidos.

Los técnicos, con frecuencia intentan transformar *enteramente* algún componente metálico en otro de mayor dureza o cuyo estado sea más deseable, pero no siempre lo consiguen y a menudo no es necesario ni aporta beneficio alguno. Ciertos tipos de acero, por ejemplo, están dotados de una superficie de gran dureza, pero son tan quebradizos que se fracturarían con excesiva facilidad si se utilizasen para la fabricación de piezas. En tales casos, lo que los técnicos intentan conseguir es un endurecimiento de parte o de la totalidad de la superficie que no afecte el interior de la pieza de metal.

Existen dos métodos para conseguirlo. El primero consiste en aumentar la temperatura y el segundo en incrementar la presión. En otros tiempos, los herreros utilizaban una combinación de ambos métodos al golpear una pieza de metal precalentada con el fin de incrementar su dureza. Actualmente, en las cadenas de montaje de la General Motors y en otras empresas, unos láseres de dióxido de carbono de haz continuo cumplen la misma función sirviéndose exclusivamente del calor. Además, los científicos, estudian la forma de endurecer ciertas aleaciones del aluminio con las ondas de choque que provocan las pulsaciones de los láseres al incidir sobre la superficie de los metales.

En el proceso industrial, el metal se cubre con alguna sustancia que absorba la radiación del láser en una proporción mucho mayor que el propio metal, que en otro caso reflejaría gran parte de la energía del haz generado por el láser de dióxido de carbono. A continuación se desplaza el haz de forma que barra la totalidad de la superficie. La cantidad de calor absorbida por el metal dependerá de la intensidad del láser, de la velocidad a la que se desplace y de la energía que absorba la sustancia

que se haya aplicado sobre el metal. La cantidad de calor determinará a su vez el espesor de la capa superficial del metal que se transforme.

Dicho método ofrece varias ventajas. En primer lugar es eficaz desde el punto de vista de la energía —a pesar del relativamente bajo rendimiento del propio láser—, puesto que el calor se dirige exclusivamente al lugar donde se enfoque el haz de luz; es menos probable que por métodos de calentamiento convencionales que se combe la parte del material que está siendo tratada; no hay necesidad de refrigerar la pieza puesto que se enfría automáticamente al mover el láser; y además permite tratar zonas de difícil acceso.

El tratamiento térmico se ha convertido en una de las aplicaciones principales de los láseres continuos de dióxido de carbono cuya potencia sea superior a un kilovatio. Como prueba de su éxito en la industria automovilística, sólo la General Motors utiliza más de veinte láseres para el tratamiento de componentes, desde camisas de cilindros para locomotoras hasta árboles de levas para automóviles.

LO QUE NO FUNCIONA

Para muchas aplicaciones industriales el láser posiblemente constituya el descubrimiento más extraordinario desde el invento de la máquina de cortar pan; sin embargo, ésta es una de las múltiples actividades para las cuales está dotado de poquísima destreza. Esta es una lección que mucha gente ha aprendido a costa de errores en los años transcurridos desde el invento del láser.

El láser es inútil para cortar comida, nos confesó un técnico especializado mientras almorzábamos juntos. Corta los productos culinarios a la perfección, el problema estriba en que a continuación no hay quien quiera comérselos. Cuando los ingenieros de su empresa quisieron cortar pan, lo que consiguieron fueron tostadas. Intentaron cortar pescado crudo y acabó cocido. Perforaron caramelos y obtuvieron azúcar carbonizado.

Existe una anécdota relacionada con la historia de las tostadas. Cuando en otra ocasión, poco tiempo después, almorzábamos con otro técnico, éste nos contó encantado cómo habían logrado deshacerse en su empresa de un panadero que había llegado un buen día a su despacho con la esperanza de que le cortasen varias piezas de pan con el láser. Los demás

ingenieros lograron convencerle de que en su empresa no hacían aquel tipo de trabajos... pero que podía dirigirse a otra empresa cercana donde sí los hacían. Se trataba, por supuesto, de la competencia. Le dijeron que en aquella empresa había un ingeniero cuya especialidad consistía precisamente en cortar pan con un láser y le dieron el nombre del presidente de la compañía. No sabemos exactamente lo que ocurrió a continuación, pero deseamos aclararles que aquella segunda empresa era la de las tostadas de la que hemos hablado en el párrafo anterior.

El estudio de otras aplicaciones ha llegado a ir más lejos antes de demostrar su inutilidad. Una de ellas consistía en el uso de láseres para despedazar rocas en las minas o en la excavación de túneles. En los años 60 se comenzaron a conseguir algunos esperanzadores resultados que indicaban la posibilidad de que si se dirigía un haz de alta potencia contra una roca se contribuiría a despedazarla para poderla extraer con mayor facilidad. Sin embargo otros estudios más avanzados probaron que la técnica no sería práctica.

Finalmente existen ciertas ideas que sólo pueden parecer acertadas a quienes tengan un desconocimiento prácticamente total sobre el láser. En la redacción de la revista *Láser Focus*, por ejemplo, en una ocasión recibieron la llamada de un individuo que pretendía servirse de un láser para cortar nítidamente los setos de su jardín. Evidentemente no tenía ni la más ligera idea del tamaño del láser que necesitaría (similar al de una lavadora automática) ni de su coste (unos 10.000 dólares) comparado con el de un cortador mecánico convencional. Tampoco había comprendido que el aparato que buscaba no sería capaz de funcionar en las condiciones a las que habitualmente se someten las herramientas de jardinería.

Otra persona, que se identificó diciendo que trabajaba en la «industria del petróleo», preguntó si podría utilizar un láser para perforar a más de mil metros bajo tierra. Inicialmente no se dejó desalentar por su elevado coste. Aclaró que intentaba reemplazar un equipo mecánico de perforación cuyo valor oscilaba entre los 6 y los 10 millones de dólares. No fue fácil lograr que comprendiese que lo que él deseaba *no podía* hacerlo un láser por varias razones. En primer lugar les falta potencia para perforar miles de metros (unos pocos centímetros presentan ya enormes dificultades), en segundo lugar sería imposible evacuar el material sublimado y por último, en el supuesto de que fuese posible construir un láser capaz de llevar a cabo la empresa que deseaba, el Departamento de Defensa de

Estados Unidos, se aseguraría probablemente de que toda la información relacionada con el mismo se convirtiese en secreto de Estado.

9. LA REGLA OPTICA: EL LÁSER COMO INSTRUMENTO DE MEDIDA

Los que hayan intentado reparar una casa antigua se habrán dado cuenta de lo muy difícil que era en la antigüedad mantener una línea recta. Tanto sus paredes como sus ángulos pueden parecer rectos, hasta que uno intenta empapelarlas. Entonces descubre que ni los marcos de las puertas ni los de las ventanas son exactamente paralelos a las aristas de las paredes y que la anchura superior e inferior de las mismas puede llegar a diferir en más de medio centímetro. En casas de más de un siglo, las diferencias pueden ser muy superiores. Dichas discrepancias no son siempre debidas a movimientos del edificio posteriores a su construcción, ni a la incompetencia del constructor, como lo suele demostrar la solidez de las casas en cuestión. La causa del problema la constituían, en gran parte, las inadecuadas herramientas de las que disponían para tomar medidas en aquella época.

En la actualidad, los láseres contribuyen a que los contratistas mantengan líneas rectas y sus correspondientes perpendiculares. Si un carpintero desea, por ejemplo, colocar una barandilla alrededor de las cuatro paredes de una habitación, puede instalar en su centro un instrumento láser. El láser no se mueve, pero dicho instrumento contiene un prisma que gira continuamente dibujando una línea recta sobre las paredes con mucha mayor precisión y menor engorro que por procedimientos manuales. También se utiliza como punto de referencia constante para la alineación de suelos y techos y, si se le acopla un prisma especial, dibuja ángulos rectos perfectos que facilitan la instalación de puertas, ventanas, etc.

Contribuir a que las líneas sean más rectas en el campo de la construcción no es sino una de las múltiples aplicaciones de la regla óptica. A finales de los años 60 y principios de los 70, los láseres comenzaron a ser utilizados en múltiples tareas, tanto en la construcción, como en los talleres mecánicos. Su desarrollo fue muy rápido y en la actualidad se cuenta con más de 100.000 láseres destinados a tomar medidas en la construcción, la industria y la agricultura. Prácticamente en todos los casos se utilizan instrumentos de baja potencia de helio-neón, que emiten haces continuos y que, si bien sus partes principales sólo cuestan unos centena-

res de dólares, su precio aumenta considerablemente cuando se le agregan todos los accesorios necesarios.

En los procesos industriales contribuyen a medir tanto distancias como ángulos, y entre sus numerosas aplicaciones se cuentan el tendido de canales de desagüe, sistemas de irrigación en la agricultura y la alineación de piezas de alta precisión. Asimismo pueden detectar pequeñísimos movimientos geológicos o contaminantes atmosféricos cuyas concentraciones sean del orden de 0,001 ppm (partes por millón). Ciertos láseres especiales son incluso capaces de detectar rotaciones y se utilizan como giroscopios en los aviones.

Los científicos han comenzado a usarlos para tomar medidas de alta precisión del tiempo, del movimiento de la tierra y de pequeñísimas concentraciones de ciertos productos químicos. La importancia del uso científico de los láseres se reconoció oficialmente al conceder el premio Nobel de física de 1981 a los fundadores de la espectroscopia láser. Se utiliza una enorme variedad de instrumentos en el campo científico, algunos de los cuales cuestan decenas de miles de dólares.

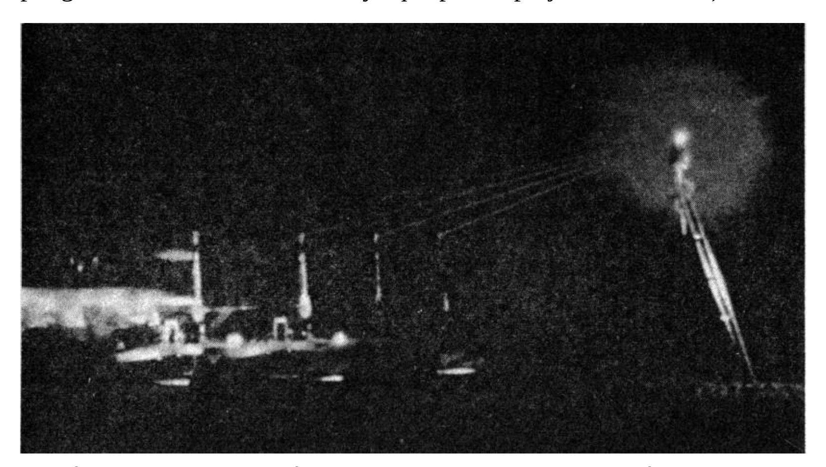
En primer lugar nos ocuparemos de las mediciones que se efectúan en los procesos industriales.

LOS LÁSERES EN LA CONSTRUCCIÓN

A medida que aumenta el tamaño de los edificios, crece también la necesidad de que las líneas y los ángulos rectos sean perfectos. En los últimos años se han perfeccionado ciertos instrumentos ópticos destinados a facilitar la labor de los constructores e inspectores de obras y, si a ellos se agrega un láser, se convierten en aparatos alineadores de altísima precisión. Casi todos los láseres utilizados en la construcción son de helio-neón de reducido tamaño y emiten un haz de luz roja de baja potencia fácilmente visible para el ojo humano o detectable electrónicamente.

El láser más simple utilizado en la construcción es el de alineación. En su forma más sencilla, se instala en algún lugar y, desde él, define una línea recta que los obreros, para verla, deben interceptar con un pedazo de papel o cualquier otro objeto. (No olvidemos que, en condiciones normales, no es posible ver un haz láser a lo largo de su trayectoria; sólo

se manifiesta cuando algo se interpone en su camino. Además, sería peligroso mirarlo directamente, ya que podría perjudicar la vista.)



Los láseres se utilizan también para controlar equipos de nivelación del terreno. Al no precisar de otras fuentes de luz que la propia, pueden utilizarse incluso durante la noche, como muestra la foto. Spectra-Physics

Los sistemas más complejos de alineación disponen de receptores electrónicos para detectar el haz y producen a su vez señales con las que se pueden controlar las máquinas que se utilicen. Una excavadora por ejemplo, puede ser dirigida para que cave en la dirección y a la profundidad adecuadas. Para lograrlo se instala un láser sobre un trípode de forma que su haz indique el ángulo deseado y un detector de luz en la pala de la excavadora. Gracias a los controles automáticos de la máquina la pala se mantiene en todo momento en la misma dirección que el haz y por consiguiente cava el surco deseado. Otra aplicación muy corriente la encontramos en la agricultura, en el tendido de redes de riego. Cuando lo que se desea es utilizar la menor cantidad de agua posible, con un mínimo de erosión, el grado de pendiente de los canales es de suma importancia, y el sistema de alineación automático láser es el mejor.

El grado de pendiente no sólo es de gran importancia en la construcción de canales de riego, sino en la de desagües y alcantarillas. Para controlar automáticamente la construcción y la profundidad de dichos cana-

les y desagües podemos, pues, utilizar esos nuevos instrumentos de alineación.

Los láseres solucionan limpiamente un antiquísimo problema que se presenta en la excavación de túneles: asegurarse de que ambas mitades coincidan en un centro común. Los instrumentos de alineación láser facilitan evidentemente la excavación en línea recta y, si trabaja un equipo en cada lado del túnel, tendremos dos haces láser proyectados desde los extremos de aquél. Auxiliados por otros instrumentos, entre los que por cierto se cuentan también los láseres, determinaremos la posición relativa de ambos rayos, de modo que puedan efectuarse los ajustes necesarios para que los equipos coincidan finalmente en el centro.

Como hemos mencionado anteriormente, los haces láser no sólo pueden determinar una línea recta, sino la entera superficie de un plano, como en el caso de la construcción cuando se utiliza un prisma giratorio. Con ello no sólo se facilita la labor de los constructores para asegurar la posición correcta de ventanas, techos, suelos, etc., sino que pueden llevarse a cabo ciertas tareas especializadas propias de la construcción actual, como por ejemplo la instalación de techos suspendidos, andamios y sobresuelos como los utilizados en salas de ordenadores para proteger los numerosos cables. Los constructores que utilizan dichos instrumentos aseguran que la producción ha aumentado de un 25 a un 50 por ciento, que se ha incrementado la precisión y que se usan con mayor eficacia los recursos humanos, debido a que los técnicos y los inspectores de obras pueden dedicarse a otras labores.

AGRIMENSURA (O TOPOGRAFÍA)

En agrimensura (o topografía) al igual que en la construcción, lo primordial es poder determinar la rectitud de las líneas. Con instrumentos modernos, basta con alinear un telescopio sobre un punto lejano y dirigir un haz láser hacia el punto en cuestión sirviéndose del mismo sistema óptico. Por razones de seguridad, el láser no se conecta mientras no se haya dejado de mirar a través del telescopio. Instrumentos semejantes pueden utilizarse también para medir ángulos.

Esos instrumentos topográficos están siendo utilizados para multitud de operaciones, como alinear barandas, paredes, muros de contención y

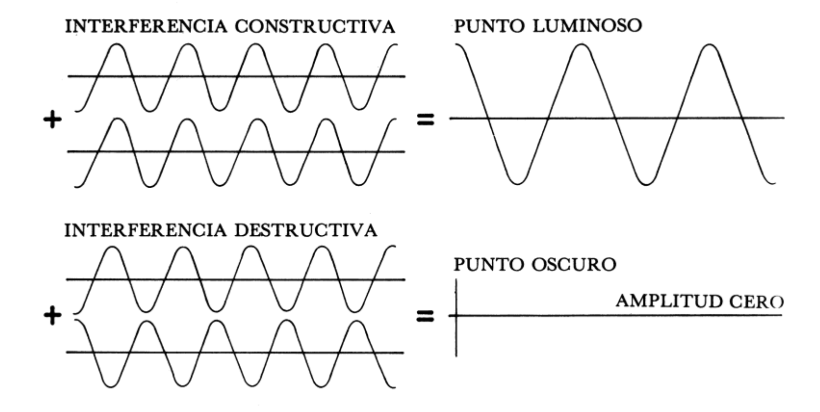
surcos de sembrados, construir pistas de atletismo, graduar la pendiente de las piscinas, calles y carreteras, así como la de los canales de riego. Se emplean también en el allanamiento de terrenos, en la alineación de las estructuras metálicas de los edificios, en obras de cimentación y en la construcción de cloacas.

Existe otro instrumento láser con el que se pueden medir distancias incluso de muchos kilómetros, de un modo automático. Al igual que en el caso anterior, se enfoca el telescopio o los prismáticos para que la línea de visión coincida con un espejo denominado retrorreflector instalado en el extremo opuesto. A continuación se activa el haz que será reflejado por el espejo, y regresará a su punto de partida; y el tiempo que tarde la luz en realizar el recorrido determinará la distancia entre ambos puntos. Para ello se pueden utilizar láseres de helio-neón, que emiten un haz rojo continuo, o láseres de semiconductores, ya sean pulsados o continuos, en la región del infrarrojo cercano. En ambos casos la divergencia del rayo es lo suficientemente elevada como para que no exista peligro para la vista.

Los telémetros de láser han tenido un enorme éxito entre los topógrafos, puesto que les permiten medir distancias de hasta 65 kilómetros automáticamente y con mucha mayor precisión y rapidez que los instrumentos convencionales. Han permitido relacionar, por ejemplo, puntos de fotografías aéreas con medidas de la superficie del Gran Cañón del Colorado en una zona de más de 800 km^2. Con el fin de que las fotografías aéreas sean útiles para la elaboración de mapas es preciso establecer ciertos puntos de referencia. Para lograrlo, los topógrafos deben medir la distancia entre dichos puntos y localizarlos en la fotografía, lo que en una zona tan extensa y agreste como la del Gran Cañón supondría una labor extremadamente ardua si se tuviese que realizar con instrumentos convencionales. Como dato curioso hay que decir que, con ellos, cien personas tardarían un año en hacerlo. Sin embargo, con la ayuda de los modernos instrumentos láser, un equipo compuesto de dos topógrafos lo logró en tres días. Además, sus medidas fueron mucho más precisas debido, en parte, a la precisión intrínseca del láser y, en parte, al hecho de que se evitasen muchos tipos de errores humanos.

LA MEDICIÓN DE LOS MOVIMIENOS DE TIERRA

Con la ayuda de los láseres pueden realizarse mediciones a gran escala para ayudar a los científicos en la previsión de los terremotos y en otros campos de la investigación geofísica. Los terremotos suponen grandes desplazamientos de la superficie de la Tierra, pero existen también pequeños y sutiles movimientos que pueden señalar las zonas peligrosas que se encuentran sometidas a tensiones. Estos pequeños movimientos son, precisamente, los que el láser es capaz de medir con absoluta exactitud.



11. Si superponemos dos ondas que estén exactamente en fase, obtenemos una interferencia constructiva, lo que significa que se suman dichas ondas para producir una tercera cuya amplitud equivale a la suma de las otras dos: el resultado es un punto luminoso. Si por otra parte superponemos dos ondas tan desfasadas entre sí como les pea posible, obtenemos una interferencia destructiva, lo que significa que se cancelan mutuamente y el punto resultante será oscuro.

Una de estas técnicas es la que utiliza el satélite geodinámico láser denominado LAGEOS, que fue lanzado en 1976. En dicho satélite no hay ningún láser, pero su superficie está cubierta por 426 retrorreflectores que reflejan los pulsos ultracortos (de sólo 60 cm de longitud) emitidos por una serie de láseres especiales, situados en la Tierra, de forma que su camino de vuelta sea idéntico al de ida. A su regreso, y con la ayuda de otros instrumentos, se determina con absoluta precisión el

tiempo empleado en hacer el recorrido y la posición exacta del satélite. La información recogida en otros puntos del globo por sistemas similares es procesada por ordenadores, lo que permite a los geofísicos conocer con toda exactitud —con un error máximo de dos o tres centímetros— cuál es la posición relativa de dos puntos de la superficie de la Tierra. Con mediciones sucesivas se descubren pequeños cambios que no serían detectables por ningún otro procedimiento.

Los movimientos locales de la superficie se pueden detectar con una precisión extraordinaria por medio de mediciones realizadas a través de una falla con instrumentos láser situados sobre la superficie. Dos científicos de la universidad de Washington, George R. Huggett y Larry Slater, verificaron dichos instrumentos cerca de dos fallas de Hollister, California, en 1975, y en un solo mes consiguieron información que habrían tardado más de un año en recopilar por procedimientos convencionales. El equipo láser que utilizaron era capaz de medir de 1 a 10 kilómetros con una precisión de uno sobre 10 millones, es decir permitiendo un error máximo de 0,1 a 1 mm.

Ni la medición de fallas ni el satélite LAGEOS permitirán la previsión de terremotos con cierta precisión en un futuro próximo, pero no por ello es nula su utilidad en este campo. Su función consiste en facilitar medidas precisas de los movimientos de la tierra que los geofísicos pueden comparar con las pautas de los terremotos. Se tardarán muchos años en comprender las relaciones existentes entre los terremotos y los movimientos de la tierra, pero, cuando se consiga, las medidas precisas que los láseres facilitan servirán para indicar los lugares exactos donde puedan ocurrir movimientos sísmicos.

MEDIDAS MICROSCÓPICAS LÁSER (INTERFEROMETRÍA)

Hasta estos momentos hemos hablado de la medida de distancias lo suficientemente grandes para ser vistas; sin embargo, la precisión del láser permite que se midan además otro tipo de distancias. Gracias a la propiedad coherente de la luz láser, es decir, el hecho de que las ondas se desplacen exactamente en fase, se pueden llegar a medir distancias incluso menores que la de la longitud de una sola onda con una técnica denominada *interferometría*.

Una propiedad especial de las ondas consiste en su capacidad para *interferir* entre sí, lo que significa que, si se superponen dos ondas, se suman sus alturas o amplitudes. Supongamos, por ejemplo, que superpusiésemos dos ondas de idéntica longitud de onda. En el caso de que estuviesen exactamente en la misma fase se sumarían *constructivamente*, es decir formarían una onda de mayor tamaño cuya amplitud sería el doble de la de las ondas originales (véase el diagrama N.° 11). En el caso de que estuvieran tan desfasadas como fuese posible, interferirían entre sí *destructivamente*, es decir, se cancelarían sus amplitudes mutuamente, dando lugar a una amplitud resultante nula. En los casos intermedios la amplitud resultante será también intermedia entre los valores anteriores.

Las ondas de un láser determinado son de la misma longitud de onda y comienzan siempre en fase, por consiguiente cualquier interferencia entre dos ondas luminosas procedentes de la misma fuente y que lleguen al mismo punto por conductos diferentes sólo puede ser causada por la diferencia de la longitud de ambos conductos. En el caso de que la diferencia corresponda a un número exacto de longitudes de onda (por ejemplo siete) el punto será brillante debido a que las ondas habrán interferido entre sí constructivamente. En el caso de que la diferencia corresponda a un número exacto de longitudes de onda más la mitad de otra (por ejemplo siete y medio) el punto será oscuro, porque las ondas habrán interferido destructivamente.

Estas constituyen las bases del instrumento denominado *interferómetro* y, que en su forma más simple está formado por un láser, un par de espejos y una lámina semitransparente, cuya función es la de dividir el haz del láser en dos haces de luz de intensidades aproximadamente iguales. Entonces se dirige un haz a cada espejo, y éstos los reflejan hacia un punto en el que interfieren los dos haces de luz. Para medir distancias con el interferómetro se fija uno de los espejos y se mueve el segundo sobre la distancia que se desee medir. Al moverlo, el punto de interferencia se oscurece, ilumina y vuelve a oscurecerse. Cada uno de estos ciclos indica que la diferencia entre las distancias recorridas por los dos haces de luz ha variado en una longitud de onda. Por consiguiente, para medir la distancia en cuestión basta con contar el número de ciclos observados y multiplicar el resultado por la longitud de la onda. El método es simple y de extrema precisión.

El ejemplo precedente es puramente teórico. Hoy en los procesos industriales se utilizan interferómetros para asegurarse de que no varían ni las dimensiones ni la posición de los aparatos mecánicos. En tales casos, los interferómetros comparan un haz de luz que se desplaza a lo largo de la distancia que se desea verificar con otro cuya distancia es fija con respecto al instrumento. Al comenzar la jornada laboral se ajustan de forma que el punto detectado por el sensor sea brillante u oscuro. Cualquier variación indicará que ha tenido lugar algún movimiento y la información procesada por un sistema de control permitirá que se hagan automáticamente los ajustes necesarios.

¿Qué objeto tiene tanta precisión? Las herramientas mecánicas se calientan con el transcurso del día, y el calor hace que se dilaten. También observan pequeñas vibraciones que los láseres, a su vez, son capaces de detectar. En realidad no sólo miden, sino que permiten que se ajusten automáticamente variaciones de hasta 0,001 mm. Por supuesto no siempre es necesario trabajar con tanta precisión, pero en algunos casos, como por ejemplo en la construcción de motores a reacción, es esencial.

Hasta estos momentos sólo hemos hablado de contemplar la interferencia en un solo punto, sin embargo el fenómeno se repite en cada uno de los puntos en que ambos haces convergen. En los casos en que la interferencia es visible sobre una larga distancia se ven franjas luminosas y oscuras alternadas, que corresponden a las zonas donde la interferencia es constructiva y destructiva respectivamente. Con los instrumentos ópticos adecuados es posible servirse de la interferometría para determinar con exactitud el perfil de cualquier superficie.

Para comprender esta capacidad consideremos otro ejemplo hipotético. Supongamos que nos interese averiguar el grado de allanamiento de una superficie. Lo único que necesitaríamos para ello sería un láser y un trozo de cristal extremadamente plano. Colocaríamos el cristal sobre la superficie y dirigiríamos contra el mismo la luz del láser. Una parte de la luz sería reflejada por el propio cristal, pero otra parte lo atravesaría y sería reflejada por la superficie. La luz reflejada por el cristal y la reflejada por la superficie interferirían entre sí y se formaría un dibujo de franjas que indicaría las diferencias de allanamiento existentes entre el cristal y la superficie. En el caso de que las franjas fuesen escasas y dispersas concluiríamos que la superficie era prácticamente plana, mientras que si abundaban y estuviesen apretadas, nuestra conclusión sería la opuesta.

Los contornos de las franjas nos habrían indicado el grado de rugosidad de la superficie.

A pesar de que la razón que nos ha inducido a hablar de una superficie plana ha sido la sencillez del ejemplo, tiene también ciertas aplicaciones prácticas; la verificación de lentes y espejos de alta precisión, como los utilizados en los telescopios. Al igual que en el ejemplo anterior, para realizar dichas pruebas se utiliza una lente cuya perfección es conocida y se coloca sobre la pieza que se desee comprobar. A continuación se superponen el haz de luz reflejado por dicha lente y el de la pieza sometida a prueba para obtener una figura de interferencia. Este método de verificación de instrumentos ópticos se utilizaba ya muchos años antes de que se descubriese el láser, con luz incoherente; sin embargo, en la actualidad se suele utilizar un modelo de helio-neón, debido a que la calidad de su figura de interferencia es superior.

CONTROL EN LA CADENA DE MONTAJE

Los láseres se utilizan también para realizar medidas fiables en los productos que salen de las cadenas de producción. En su forma más elemental, se instalan junto a un transportador con el haz de luz dirigido a una altura ligeramente superior a la máxima permisible del producto. En el caso de una empresa que fabrique latas metálicas para alguna fábrica de conservas y que la altura óptima de las mismas deba ser de 10 cm, se ajustaría el haz junto al transportador a una altura que excediese mínimamente la deseada. Normalmente el haz llegaría hasta un receptor situado al otro lado de dicho transportador, pero cuando algo interrumpiese su trayectoria el mecanismo comprendería que había una lata imperfecta.

Existen otros métodos de inspección de mayor complejidad y precisión, como por ejemplo el que consiste en instalar un láser encima del transportador de forma que proyecte su haz sobre las partes superiores de las piezas que se verifiquen a un ángulo determinado. Una lente recoge la luz reflejada y la focaliza sobre un detector largo y estrecho que la convierte en impulsos eléctricos que varían según el lugar en el que el haz incide sobre el detector. El punto en el que el haz de luz incide sobre el detector está naturalmente determinado por la altura del componente que se encuentre sobre el transportador y los impulsos eléctricos permiten

que el operador u otro dispositivo conozca con absoluta precisión el tamaño de cada producto.

CONTROL DE CALIDAD DE TELAS A 88.000 KILÓMETROS POR HORA

Los láseres contribuyen también a eliminar el terrible engorro que supone la inspección manual de productos textiles. Varias empresas de Carolina del Norte y Carolina del Sur utilizan equipos basados en láseres de helio-neón construidos por una empresa subsidiaria de la Ford denominada Ford Aerospace and Communications. Según las empresas textiles dicho método es mucho más rápido y preciso que el manual.

«Cuando se acerca el fin de su jornada laboral la buena señora (la inspectora) está lógicamente cansada», ha declarado Robert Thompson, portavoz de la empresa Spring Mills Inc., que usa láseres textiles en sus fábricas de Ft. Mill y Chester en Carolina del Sur. La luz de los láseres que utilizan se divide en tres haces independientes que a una velocidad de 88 000 kilómetros por hora recorren todos los puntos de una pieza de tela cuya anchura oscila entre 1 y 1,6 m y se desplaza a 4 metros por segundo. En el momento en que los instrumentos detectan algún defecto, un dispositivo situado a escasos metros del láser expele tinta sobre la zona defectuosa para facilitar su arreglo posterior. Al mismo tiempo, dichos instrumentos graban no sólo el lugar donde se encuentra el defecto, sino su naturaleza; lo cual es de suma importancia, pues aunque en algunos casos se puede reparar, en otros es preciso reemplazar parte de la tela.

La instalación de un equipo de láser cuyo precio global se supone extraoficialmente que ha sido del orden de los 225.000 dólares, sin incluir otros 75 000 dólares en accesorios, les ha permitido a Spring Mills reducir en un 60 o 70 por ciento el número de inspectores que, según ellos, desempeñan actualmente otras funciones en la misma empresa.

DETECCIÓN DE BORDES IRREGULARES

Si les colocasen unas lentillas oculares con los bordes rugosos o les inyectasen con una aguja cuya punta estuviese torcida ¿imaginan su

reacción? El caso es que cabe la posibilidad de que ocurra, pero una nueva aplicación de los láseres consiste precisamente en evitarlo.

Uno de los descubrimientos extraordinarios para el tratamiento de cataratas consiste en la implantación de lentillas. Las cataratas se producen cuando las lentes naturales de los ojos pierden su transparencia y en tales casos los cirujanos generalmente logran reemplazarlas por lentillas de plástico. Habitualmente se fijan con suturas o grapas pero aproximadamente en un tercio de los casos se colocan junto al tejido ocular y la más mínima rugosidad podría irritar o incluso lesionar el ojo.

Se han sugerido dos métodos para detectar las posibles rugosidades de las lentillas. El primero consiste en hacer que dos haces láser coincidan sobre el borde de la lentilla, de forma que las franjas de interferencia en la luz reflejada indiquen las posibles irregularidades. El segundo estriba en focalizar un haz sobre un diminuto punto de 0,01 mm de diámetro en el borde de la lentilla y la luz reflejada revela la existencia o ausencia de rugosidades. David W. Vahey, de los laboratorios Columbus de Ohio que pertenecen al Battelle Memorial Institute y Edward Mueller, del departamento médico de la Administración de comestibles y medicamentos, son quienes intentan perfeccionar ambos métodos.

Por otra parte se utilizan ya los láseres para evitar el dolor que las rugosidades u otros defectos de las agujas hipodérmicas podrían causar. La técnica se basa en la forma en que se dispersa la luz de un láser de helioneón al entrar en contacto con la punta de una aguja. Se desplazan las agujas en posición vertical frente a un haz láser y un detector especial de varios elementos colocado detrás de las agujas analiza la luz dispersada. Entonces se transmite la información recopilada a una minicomputadora que la compara con la de una aguja perfecta. Dicho equipo puede llegar a inspeccionar doce agujas por segundo, que corresponde al ritmo de producción de las mismas y que ningún ser humano lograría igualar. El equipo en cuestión fue elaborado por Recognition Systems Inc., de Van Nuys, California.

VERIFICACIÓN DE UNIONES SOLDADAS

Los métodos de inspección láser no se limitan en todos los casos a observar pasivamente algún objeto. Con el fin de verificar uniones solda-

das la empresa Vanzetti Infrared & Computer Systems Inc., de Cantón, Massachusetts, ha elaborado un sistema que consiste en calentar las uniones con pulsaciones de un láser de YAG y neodimio sin llegar a fundir la soldadura. A continuación un detector de radiación infrarroja observa el enfriamiento de la unión y compara su «firma térmica» —es decir la cantidad de radiación infrarroja emitida en un tiempo determinado— con la de distintos modelos de enfriamientos, buenos y malos, de condición conocida.

Según sus inventores la mencionada técnica complementaría la inspección por ultrasonidos de circuitos impresos que se usa en la actualidad. En 1980 se estaba construyendo en la empresa Vanzetti un prototipo de dicho sistema para el Centro de logística de las Fuerzas aéreas norteamericanas en Sacramento.

AGUAS RESIDUALES Y PERIÓDICOS

Los láseres son también capaces de controlar ciertas operaciones en su totalidad. Por ejemplo, permiten el control de la concentración de sólidos en suspensión en aguas residuales y la información obtenida contribuye a regular su proceso de formación. La aplicación más común de dicho sistema consiste en el tratamiento de dichas aguas en estaciones depuradoras.

Otra aplicación totalmente diferente de los láseres que es de gran utilidad en los talleres donde se imprimen los periódicos se basa en su capacidad para contar con exactitud las hojas impresas. Un equipo muy elemental construido por Nosler Systems Inc., de Eugene, Oregon, cuyo precio es de unos 3.000 dólares, llega a contar entre 30 y 40 mil ejemplares sin cometer error alguno. Varios centenares de periódicos, entre los que se cuentan el *San Francisco Chronicle, Los Angeles Times* y el *Cleveland Plain Dealer,* utilizan dichos equipos.

MADERERÍA

Una cosa que estimuló el interés en contar periódicos con exactitud fue el creciente coste del papel, y el de la madera que se utiliza para fabricar aquél. Actualmente, gracias a las técnicas de medición con láser,

la industria maderera logra que cada tronco rinda más que con cualquier otro método.

El equipo láser más elemental que se utiliza en dicha industria es el de «guía», que consiste simplemente en un instrumento de helio-neón con un espejo acoplado que proyecta un haz de luz a lo largo del tronco. Se ajusta la sierra de forma que siga la línea roja del láser, que indica el lugar por donde pasará ésta y, a la vez, permite que el operario coloque el tronco en la posición deseada. Estos equipos son muy baratos (entre 800 y 1.000 dólares) y hay varios miles ya repartidos por el mundo.

En la industria maderera se ha despertado también un creciente interés por un nuevo instrumento de mayor complejidad, que después de analizar y medir las dimensiones del tronco transmite la información a una computadora que calcula la forma de obtener el mayor rendimiento de aquél. Para la obtención de hojas para el contrachapado se utilizan instrumentos de la mayor complejidad, cuyo modo de operar recuerda el despliegue de un rollo de papel: mientras se hace girar el tronco sobre su eje, una cuchilla de 2,4 m de longitud corta una capa de 3 mm de espesor.

El uso del láser para dicha operación puede llegar a dar un rendimiento de un 5 a 10 por ciento superior al método convencional, el cual marcaba el eje de rotación a partir de los bordes, en lugar de medirlo y calcular el verdadero eje del cilindro perfecto que se puede obtener. En un tronco de unos 30 cm de diámetro, la corrección necesaria suele ser de unos pocos milímetros sólo, pero dado el elevado coste de la madera —especialmente el de las hojas de contrachapado— así como el enorme volumen de producción, se prevee que los nuevos equipos, cuyo precio puede llegar a ser de unos 200.000 dólares, contribuyan a incrementar la rentabilidad de la industria maderera.

GIROSCOPIOS LÁSER

Hasta ahora hemos hablado de la facultad de los láseres para medir en línea recta, contar e inspeccionar productos; pero existen también ciertos modelos con los que se pueden medir movimientos rotatorios. Dichos sensores, o giroscopios, se utilizan en los nuevos aviones Boeing 757 y 767, y se estudia la posibilidad de acoplarlos a ciertos aviones militares, así como a proyectiles dirigidos.

Para detectar el movimiento rotatorio por medio de un láser es preciso disponer de dos haces de luz procedentes del mismo láser que se desplacen en direcciones opuestas a lo largo de una trayectoria cerrada. Podemos imaginar dicho camino cerrado como un círculo, pero, en realidad, los giroscopios láser acostumbran a formar una trayectoria triangular con la ayuda de tres espejos alineados meticulosamente. El medio activo del láser lo constituyen los lados del triángulo, es decir el camino definido por los espejos que forman conjuntamente un resonador semejante al de los dos espejos descritos en el capítulo segundo.

Lo que posibilita la detección del movimiento de rotación alrededor de la trayectoria cerrada es la sutil diferencia que experimentan los haces de luz que se desplazan en direcciones opuestas. Debido a que los espejos se mueven ligeramente, la luz que se desplaza en la misma dirección que la del movimiento de rotación cubre una distancia algo superior a la que circula en dirección opuesta, lo que significa que el resonador de uno de los haces de luz es de una longitud ligeramente superior a la del otro. Puesto que el tamaño del resonador afecta a la longitud de onda, se crea una pequeña diferencia entre la frecuencia de ambos haces que se manifiesta en forma de interferencia que una computadora detecta e interpreta como movimiento rotatorio.

El modelo descrito detecta el movimiento rotatorio alrededor de un solo eje: sin embargo, como en nuestro universo tridimensional existen tres posibles ejes de rotación, los giroscopios láser utilizados por los aviones Boeing constan de tres instrumentos, uno para cada eje. La información obtenida por los mismos es analizada por una computadora que indica al piloto del avión su dirección y posición en el globo.

ESPECTROSCOPIA: SONDA ATÓMICA Y DETECTIVE DE CONTAMINACIÓN

Si bien las tónicas descritas hasta estos momentos se consideran de alta precisión a nivel industrial, en algunos casos son todavía bastante groseras comparadas con los sistemas de medidas láser ultrasensibles utilizados en los laboratorios. El láser, por sus tremendas aptitudes para efectuar mediciones de precisión, ha significado un gran avance para la investigación acerca de la constitución de la materia. Por eso se otorgó el

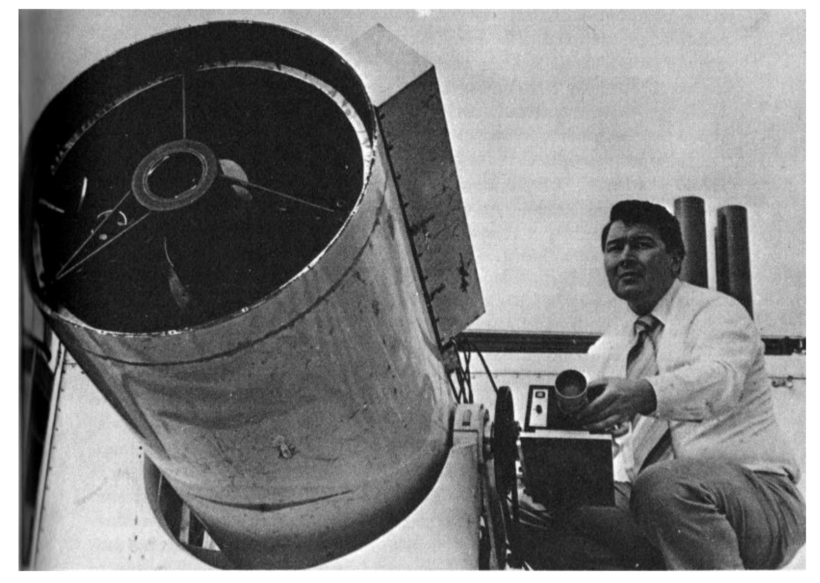
premio Nobel de física de 1981 a dos hombres cuya contribución al desarrollo de dichas técnicas ha sido fundamental: Arthur Schawlow, de la universidad de Stanford, y Nicolaas Bloembergen, de la de Harvard.

Para comprender la naturaleza y la importancia de su trabajo es preciso que nos ocupemos brevemente de la física atómica. Los átomos y las moléculas pueden ser identificados por las longitudes de onda de luz que absorben o emiten. El estudio de dichas longitudes de ondas se denomina *espectroscopia* y entre sus fines figura el de la identificación de átomos y de moléculas, así como el estudio de su estructura interna. El papel de los láseres en dichos estudios puede ser fundamental. Sintonizando la longitud de onda de un haz láser con el que se ilumine una muestra de cierto material, los científicos podrán llegar a conocer mejor sus partes constituyentes al controlar la cantidad de luz absorbida, la producción de luz en otras longitudes de onda o cualquier otro fenómeno inducido por la luz, como por ejemplo la ionización de los átomos o las moléculas.

La espectroscopia láser ha permitido ver con mayor claridad lo que ocurre en el interior de los átomos y las moléculas. La forma en que tanto los unos como las otras absorban o emitan luz indica cómo se distribuye la energía en su interior y los cambios que puedan experimentar en su capacidad de absorción o emisión reflejan su reacción ante condiciones externas. A pesar de que con frecuencia se trate de efectos sutiles, el láser es perfectamente capaz de descubrirlos. Logra detectar, por ejemplo, el ligero desdoblamiento de las líneas espectrales provocado por un campo magnético estático, u observar numerosas interacciones de átomos o moléculas, gracias a las cuales se obtiene mayor información con relación a la naturaleza de la materia. Debido a su excesiva complejidad no nos ocuparemos de los detalles, pero no cabe duda de que la espectroscopia láser ha contribuido enormemente al conocimiento acumulado por los científicos con relación a los procesos interatómicos que tienen lugar en las reacciones químicas, y que permitirán, en su día, que las técnicas utilizadas en la industria química mejoren considerablemente su calidad y rentabilidad.

A pesar de que Schawlow y Bloembergen, sexagenarios ambos, se conocen desde hace mucho tiempo, no han trabajado jamás en el mismo proyecto de investigación. Han contribuido en campos fundamentalmente diferentes, si bien complementarios dentro de la espectroscopia láser. Schawlow ha sido el fundador de la espectroscopia *lineal,* mientras que

Bloembergen ha sido el principal protagonista del estudio de las interacciones *no lineales* de la luz y la materia. Para aclarar la diferencia, fijémonos en el familiar ejemplo de un amplificador de sonido. Cuando la señal de salida no está distorsionada, es lineal, es decir, directamente proporcional a la de entrada (aumentada veinte veces, por ejemplo). Si está distorsionada se considera no lineal, y su relación con la de entrada es mucho más compleja. Los efectos no lineales pueden producir un sonido desagradable en los amplificadores, pero en espectroscopia son complementarios de los lineales puesto que revelan la existencia de ciertas interacciones que de otro modo serían imperceptibles.



Este sistema de control de la contaminación consta de un láser que proyecta luz en la atmósfera y de un telescopio que recoge la luz dispersada por los contaminantes que se controlan. SRI International

La espectroscopia es un fascinante juego en manos de los físicos y químicos y, además, cumple funciones eminentemente prácticas. Una de las más importantes consiste en el control de la contaminación atmosférica. Es posible sintonizar ciertos láseres en una longitud de onda que al entrar en contacto con el anhídrido sulfuroso (agente contaminante pro-

ducido por la combustión de carbón u otros combustibles ricos en azufre) absorba gran parte de su luz. Por consiguiente, si se atraviesa una determinada zona atmosférica con un haz de luz láser la cantidad de luz absorbida de cierta longitud de onda indicará la cantidad de anhídrido sulfuroso que contiene. Para utilizar este procedimiento era necesario disponer de un detector en el extremo opuesto de la zona analizada, aunque hoy se han descubierto ya nuevos métodos que permiten prescindir de él. La base de su funcionamiento consiste en detectar la luz *dispersada* por las partículas contaminantes desde el mismo lugar donde se encuentre el láser, de forma que la amplitud de la señal reflejada indique la concentración del contaminante. Este método permite analizar fuentes sospechosas de producir contaminación sin el conocimiento de sus causantes. La Agencia de protección ambiental norteamericana cuenta con varios prototipos, pero en el momento de escribir estas líneas no se ha generalizado todavía su uso. Pruebas parecidas se llevan a cabo en diversos lugares de Europa.

Una ventaja primordial de las técnicas láser estriba en su sensibilidad, que sobrepasa el campo de las partes por millón (ppm) para entrar en el de las milésimas de parte por millón o partes por billón (ppb) en unidades USA[1]. En pruebas de laboratorio se ha llegado incluso a detectar un solo átomo de cesio. Y si bien hasta estos momentos no se ha generalizado todavía su uso para medir concentraciones de contaminantes atmosféricos, su utilidad ha sido ampliamente demostrada en los laboratorios. La lista de datos obtenidos es larga e impresionante. Experimentalmente se han medido concentraciones de anhídrido sulfuroso, ácido sulfúrico, óxidos de nitrógeno y algunos hidrocarburos. En los laboratorios de investigación de la General Motors los han utilizado también para analizar los gases de escape de los automóviles, midiendo el contenido de monóxido de carbono, metano (el más simple de los hidrocarburos) y anhídrido sulfuroso, como parte integrante de sus estudios sobre combustión y conversión catalítica.

Según Arthur Schawlow, cabe la posibilidad de que la espectroscopia se convierta en un arma de dos filos que concierna a los sociólogos y los filósofos tanto como a los científicos. Puntualiza, por ejemplo, que a

[1] No confundir el billón USA (10^9) con nuestro billón (10^{12}). Conservamos la terminología (ppb) porque dichas unidades se utilizan en Europa en estudios de contaminación.

partir del momento en que los láseres sean capaces de identificar un solo átomo o una sola molécula de *cualquier* sustancia se detectarán fácilmente los ingredientes carcinógenos de los alimentos «¿Se dan ustedes cuenta de que es muy probable que en cualquier alimento, como por ejemplo la leche, se encuentre alguna molécula capaz de causar cáncer?», comentó Schawlow. Evidentemente es de esperar que en cualquier cantidad razonable de comida aparezca una molécula perdida de algún agente nocivo. ¿De qué nos servirá tal conocimiento? El láser puede llegar a ofrecernos una cuenta exacta de todo cuanto comemos, bebemos y respiramos, pero en realidad ¿nos interesará saberlo?

EL CRONÓMETRO LÁSER

Finalmente, los láseres se están convirtiendo en los mejores sincronizadores de relojes en el mundo entero.

A partir del momento en que se construyó el ferrocarril transcontinental fue necesario sincronizar los relojes en Estados Unidos y a raíz de la construcción de sofisticados sistemas de telecomunicación ha sido preciso sincronizarlos en el mundo entero.

En la actualidad funciona un sistema internacional de sincronización radiofónico diario con un margen de error tolerable de cien mil millonésimas de segundo (100 nanosegundos) y el Bureau International de l'Heure —organización con sede en París, y cuya función es la de conservar los patrones internacionales de tiempo— ha propuesto un sistema de láser- satélite cuya precisión permitiría un error máximo de una mil millonésima de segundo (1 nanosegundo).

La idea consiste en dirigir hacia un satélite receptor varios láseres situados en la tierra, que emitan breves pulsaciones a intervalos precisos; y con la ayuda de instrumentos, situados también en la tierra, calcular el tiempo invertido por dichas pulsaciones en el camino de vuelta desde los retroflectores del satélite. Al mismo tiempo, un receptor instalado en el satélite detectaría las señales y mediría con absoluta precisión su llegada. Las pulsaciones se emitirían en momentos predeterminados y el satélite calcularía la diferencia entre la hora supuesta y la real de su llegada, utilizando la información obtenida para sincronizar los relojes de los láseres emisores.

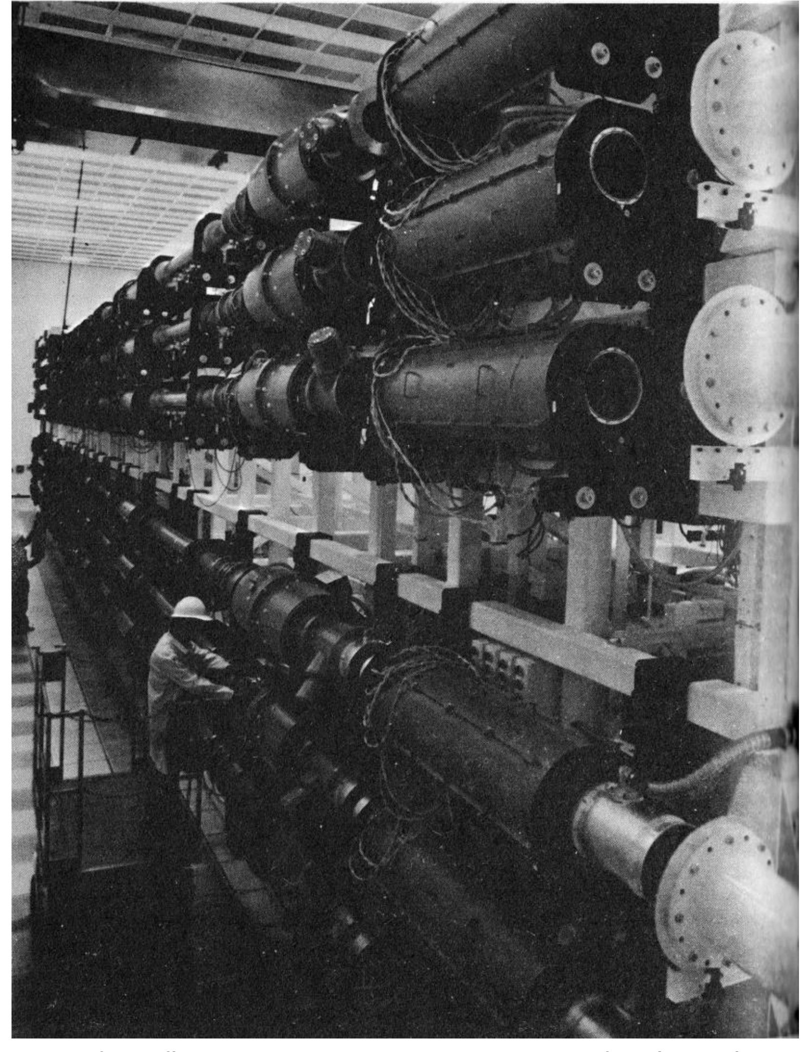
La Agencia espacial europea, con el lanzamiento, en 1981, del satélite Sirio-2, efectuó una serie de experimentos destinados a poner a prueba dicha idea. Durante las pruebas denominadas LASO (iniciales inglesas de «sincronización láser desde una órbita estacionaria») quince estaciones terrestres situadas en once países diferentes emitieron pulsaciones sincronizadas por relojes atómicos de cesio. El satélite, estuvo y está geosincronizado, es decir que su órbita corresponde exactamente al período de rotación de la Tierra y por consiguiente parece encontrarse en un punto estacionario del espacio. En primer lugar se situó sobre el océano Atlántico, de forma que las estaciones del continente americano pudiesen participar en el experimento y, más adelante, se desplazó sobre el espacio de Europa y África para llevar a cabo ciertos experimentos en comunicaciones que constituyen otra función de dicho satélite.

Los técnicos de la Agencia espacial europea y los del Centro espacial nacional francés en Toulouse programaba ya futuros experimentos destinados a reducir el margen de error en la sincronización a una décima parte de una mil millonésima de segundo (0,1 nanosegundos). Tal sincronización aportaría considerables beneficios a la precisión de la navegación, la localización y cronometraje de fenómenos celestes y contribuiría a mejorar las telecomunicaciones internacionales.

10. EN BUSCA DE ENERGIA PARA EL SIGLO XXI

Si lo que nos proponemos es producir energía con un láser, debemos conseguir en primer lugar una bolita dorada de cristal del tamaño de un grano de arena y colocarla sobre un dispositivo parecido a un alfiler. En el interior de la bolita —o gránulo— se encontrará el combustible para la fusión, combustible que consiste en una mezcla de dos isótopos del hidrógeno poco comunes, llamados deuterio y tritio. La diminuta bolita está recubierta de una capa dorada que le permite absorber energía con mayor eficacia.

A continuación dirigiremos el haz de un láser contra la bolita que, en realidad, es nuestro objetivo. O, para hablar con mayor propiedad, moveremos el objetivo para que se interponga en el camino del haz de luz, puesto que es mucho más fácil eso que mover el láser. El tamaño de éste es casi el de un edificio de cuatro pisos. Está situado en el laboratorio nacional de la Lawrence Livermore, en Livermore, California, e instalado sobre una estructura de vigas metálicas a prueba incluso de terremotos. Su precio es de unos 25 millones de dólares, y es capaz de producir en una sola pulsación, de unas mil millonésimas de segundo de duración, una energía superior a la de cualquier otro láser. Se le ha bautizado con el nombre de Shiva, en memoria de la divinidad hindú de múltiples brazos, dios de la creación y la destrucción, y consiste en un láser cuyo único haz de luz se divide en veinte derivaciones que, después de ser amplificadas varios centenares de veces cada una de ellas, convergen sobre el diminuto objetivo desde todos los ángulos. Una serie de microprocesadores ajustan las trayectorias de los veinte haces de luz para que converjan sobre el minúsculo gránulo, que es una labor que ha sido comparada con la de alcanzar un balón de baloncesto con el disparo de una escopeta de caza desde 29 kilómetros de distancia. Cuando Shiva desencadena su furia, la corteza de cristal dorado se evapora y su contenido se comprime de tal manera que los núcleos de deuterio y de tritio llegan a fusionarse bajo una presión cien mil millones de veces superior a la de la atmósfera terrestre. El resultado es una explosión mucho más reducida, pero similar a la de una bomba de hidrógeno, que genera energía de una forma muy parecida a la que se produce en el interior del sol y de las otras estrellas.



En esta fotografía vemos seis de los veinte canales de amplificación del láser de fusión Shiva. Este láser puede proporcionar casi 30 billones de vatios sobre un objetivo del tamaño de un grano de arena durante doscientas millonésimas de segundo. Lawrence Livermore National Laboratory

El procedimiento se denomina *fusión* láser y alberga la esperanza de llegar a extraer energía nuclear de una sustancia común, generalmente no clasificada como combustible: el agua del mar. Lo que acabamos de describir *ya ha ocurrido*, pero se encuentra todavía en una etapa experimental y se tardará algún tiempo antes de que pueda aplicarse a la producción de energía. El láser Shiva se encuentra en un laboratorio y no en una central eléctrica. Por el momento, la cantidad de energía que se utiliza para excitar la reacción es superior a la que se extrae; y, evidentemente, se trata de conseguir lo contrario. Además, es preciso reconocer que el progreso es lento y, en algunos casos, decepcionante. Sin embargo, científicos de la Livermore y de otros centros creen en la posibilidad de que el láser pro- porcionera clave que permita canalizar la fusión termonuclear a principios del próximo siglo.

En este capítulo nos ocuparemos primordialmente de la prometida fusión láser y exploraremos también otros campos en los que el láser pueda contribuir a satisfacer nuestras necesidades energéticas, como por ejemplo el enriquecimiento de uranio, en cuyo proceso se pueden utilizar para producir la combinación correcta de isótopos para su uso en reactores convencionales de *fisión*, así como un espectacular proyecto en el que se utilizarían haces de luz láser para transmitir a la tierra la energía solar acumulada por satélites equipados especialmente para dicha operación con colectores solares.

El lector percibirá sin duda que tras nuestra exposición de la energía del láser se oculta un común tema secundario: las implicaciones militares de toda su tecnología. La fusión láser simula la explosión de una bomba de hidrógeno. El uranio enriquecido es tan útil para fabricar bombas atómicas como para las centrales nucleares. Y un haz de luz láser con la suficiente potencia para transmitir energía desde un satélite colector de energía solar tendría también capacidad para actividades menos pacíficas (a pesar de que no estaría dotado de los instrumentos direccionales esenciales para cumplir su cometido bélico).

Comenzaremos con la fusión.

EL ATRACTIVO DE LA FUSIÓN

Una tremenda cantidad de energía se alberga en el núcleo atómico y se conocen dos métodos para extraerla: la fisión y la fusión. El primero en ser descubierto y practicado fue la fisión, que consiste en la desintegración del núcleo de un átomo pesado, como el del uranio, para convertirlo en dos núcleos de menor tamaño, generando al mismo tiempo energía. La fusión es el proceso opuesto. Consiste en unir dos átomos de menor tamaño, como los de hidrógeno, para formar otro mayor... y energía.

En la práctica se genera energía por el procedimiento de fisión al dividir átomos de uranio o plutonio en un reactor nuclear o en una bomba atómica. Hablando con propiedad, los términos «nuclear» y «atómico» pueden referirse tanto a la fusión como la fisión. Sin embargo, y de acuerdo con la práctica general, nosotros los utilizaremos para referimos exclusivamente a fisión, sirviéndonos únicamente del vocablo «fusión» para hablar del otro procedimiento. Una vez más se patentiza el hecho de que la tecnología avanza con mayor rapidez que el idioma.

La fisión presenta numerosos problemas: produce residuos radiactivos y sus combustibles (uranio, plutonio y, en algunos casos, torio) se agotarán, a lo sumo, en pocos siglos.

La materia prima básica de la fusión la constituye el hidrógeno, cuyas reservas son inmensas en las aguas oceánicas. El sol consume hidrógeno común, cuyo núcleo está formado por un solo protón, es decir el isótopo denominado hidrógeno-1. En los reactores de fusión fabricados por el hombre se utilizaría deuterio (o hidrógeno-2) que es un isótopo de mayor peso. Se trata del mismo elemento básico pero en su núcleo además de un protón hay un neutrón y representa el 0,015 por ciento de la totalidad del hidrógeno natural, a pesar de lo cual sus reservas son prácticamente ilimitadas en los mares (cada molécula de agua contiene dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno). Es probable que los primeros reactores de fusión utilicen una combinación de deuterio y tritio semejante a la descrita en el caso del gránulo dorado. El tritio es hidrógeno-3 (su núcleo consta de un protón y dos neutrones). No se encuentra en forma natural debido a la poca estabilidad de su núcleo, que se desintegra en unos doce años. Sin embargo, se puede producir con facilidad bombardeando con neutrones cierta cantidad de litio, que es un metal ligero y blando cuya

abundancia en la naturaleza es muy superior a la del uranio (hay un promedio de más de 500 átomos de litio por uno de uranio en la corteza terrestre).

En teoría al proceso de fusión podría ser relativamente limpio. Sin embargo se trata de un proyecto a largo plazo, puesto que las reacciones que probablemente tendrán lugar inicialmente en la práctica producen sin excepción tritio radiactivo y neutrones libres.

Para que se produzca la fusión es necesario que la temperatura y la presión sean sumamente elevadas. En la naturaleza la fusión tiene lugar en el interior de estrellas, como el sol, y les proporciona su energía. En la tierra, la fusión ha tenido lugar en la bomba de hidrógeno denominada en algunos casos termonuclear. Lo que no es del conocimiento general es que en el interior de dicha bomba se encuentra otra bomba atómica convencional (de fisión) que al hacer explosión proporciona la energía necesaria para desencadenar la explosión de la de hidrógeno. Desde el punto de vista destructivo funciona a la perfección, pero no es el método más adecuado para producir energía para fines pacíficos.

FUSIÓN CONTROLADA

A partir del momento en que estalló la primera bomba de hidrógeno, los físicos han buscado la forma de controlar las reacciones de fusión de manera que la energía generada pueda ser utilizada de un modo constructivo.

El principal problema en cualquier tipo de fusión consiste en calentar el plasma o el gas y comprimirlo hasta el punto necesario para que tenga lugar la reacción de fusión. Por otra parte, también es preciso retener el combustible durante un período de tiempo suficientemente largo. Para esto último existen dos métodos principales.

El más antiguo se denomina *confinamiento magnético* y, como su nombre indica, consiste en la aplicación de un campo magnético para confinar la reacción de fusión, la cual se produce en un gas caliente, el plasma, en el que todos los electrones han sido separados de sus núcleos atómicos. Por este procedimiento, los físicos intentan «atrapar» ese plasma en un «recipiente» magnético generado por enormes electroimanes. Por desgracia, es tan difícil retener en él al plasma caliente que éste

se sale siempre del recipiente. Quizá no sea tan complicado como envolver gelatina con gomas elásticas, pero ésa es una buena imagen para dar una idea de las dificultades que presenta.

En los años 50 parecía que se trataba del más lógico de los métodos, pero el poco progreso realizado, combinado por otra parte con el perfeccionamiento del láser, ha despertado el interés de un método alternativo denominado *confinamiento por inercia*, cuyos fundamentos son similares a los de la bomba de hidrógeno: se calienta el combustible con grandes cantidades de energía y se comprime hasta alcanzar una densidad descomunal. En las bombas de hidrógeno la operación de calentamiento y compresión corre a cargo de otra bomba, la atómica. En la fusión con confinamiento por inercia, se dispara un haz energético (generalmente procedente de un láser) contra un gránulo que contenga deuterio y tritio. El nombre del procedimiento se debe a que es la fuerza de la *inercia* la que comprime el combustible, creando una presión que a partir de la superficie se dirige hacia el interior oprimiendo el centro del combustible nuclear.

En la fusión láser, un breve impulso procedente de un láser de alta potencia se distribuye uniformemente sobre la superficie del objetivo (que dicho sea de paso no tiene porqué ser dorado ya que actualmente se experimenta también con otros materiales) y el calor que genera hace que en el gránulo tenga lugar una implosión, es decir un estallido hacia el interior. La forma precisa de la implosión depende del diseño del gránulo. En el más simple de los casos lo que ocurre es que se evapora el material de la superficie generándose una fuerza de inercia que comprime el resto del material provocando su implosión. Existen también gránulos de mayor complejidad, cuya información se ha guardado hasta hace poco en secreto debido a su similitud con las bombas de hidrógeno, en los cuales *gran parte* de la energía de la implosión procede de los rayos X producidos al calentar, con la ayuda de un láser, parte del objetivo a temperaturas extremadamente elevadas.

Evidentemente, existen diferencias significativas entre el procedimiento de fusión por confinamiento magnético y el de inercia. Las más cruciales se desprenden de cómo el uno y el otro cumplan los requerimientos del llamado *criterio de Lawson.* Según dicho criterio, y con el fin de que la fusión pueda tener lugar, la densidad del plasma multiplica-

da por el tiempo de confinamiento debe exceder cierto valor que depende del tipo de combustible utilizado.

En los reactores de confinamiento magnético el tiempo debe ser relativamente largo (aproximadamente una décima de segundo) para permitir que la densidad del plasma alcance las 10^{15} partículas por centímetro cúbico con el fin de que pueda tener lugar la más simple de las reacciones. Dicha densidad corresponde aproximadamente a la del aire a 120 km sobre la superficie terrestre. En el caso de fusión láser el tiempo de confinamiento sería extremamente corto (de unos 10^{-9} a 10^{-10} segundos) y por consiguiente sería necesario que la densidad del plasma alcanzase las 10^{23} a 10^{24} partículas por centímetro cúbico, comparables a la densidad del agua y unas 10.000 veces superior a la del gas en condiciones normales. En otras palabras, el fin del procedimiento magnético es un largo confinamiento con un material de baja densidad, mientras que el del láser consiste en un breve confinamiento con un combustible de gran densidad.

Ambos ofrecen ventajas, y la fusión es tan difícil de conseguir con el uno como con el otro. No obstante, en estos momentos el magnético es todavía el de vanguardia, por lo menos parcialmente, debido a que el Departamento norteamericano de Energía considera que el programa más antiguo es el que alberga las mayores esperanzas.

IMPORTANCIA DEL MÉTODO DE FUSIÓN PARA FINES MILITARES

En la investigación sobre la fusión se gastaron unos dos tercios de los 300 millones de dólares aproximadamente que el Gobierno de Estados Unidos dedicó en 1981 al estudio de la energía producida por láser. En realidad, dicho presupuesto se justifica por sus aplicaciones bélicas y no por su potencial energético. Cabe destacar que si bien la administración de fondos corre a cargo del Departamento norteamericano de Energía, el dinero procede de la división de aplicaciones bélicas y, por consiguiente, son los militares quienes deciden cómo debe gastarse dicha porción del presupuesto. Ciertos portavoces del Departamento de Energía han querido poner de relieve las aplicaciones potenciales de la fusión láser en la producción de energía para fines pacíficos, pero el caso es que hasta

estos momentos el único modo de justificar prácticamente la totalidad de la subvención federal consiste en sus aplicaciones bélicas.

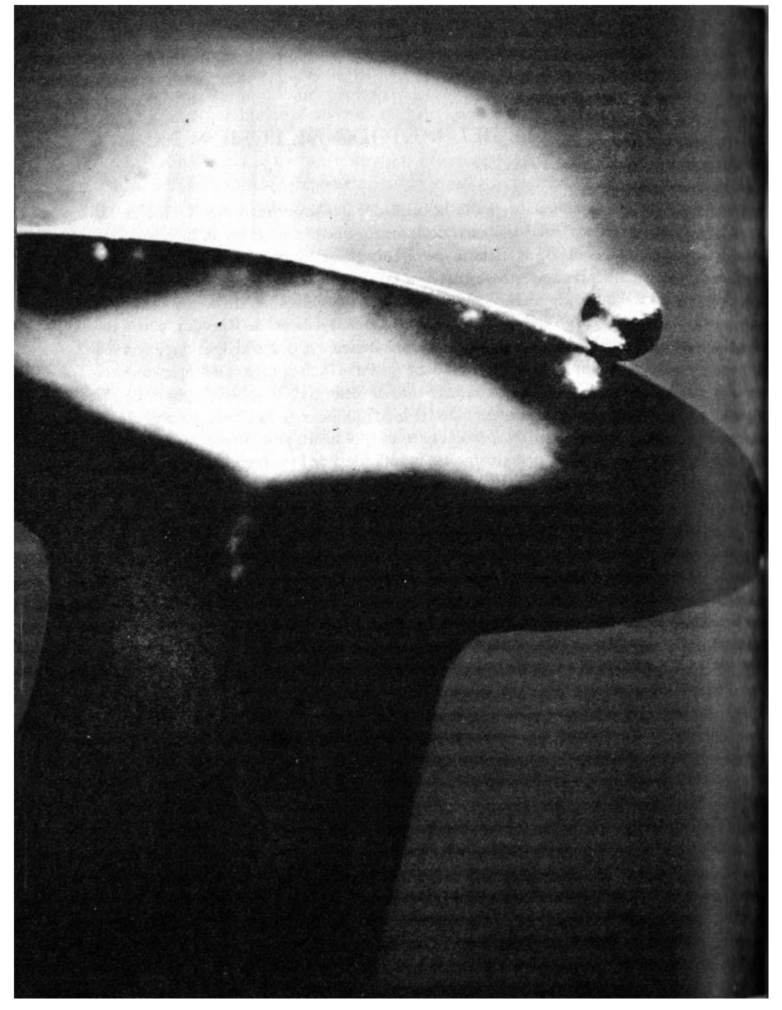
¿Por qué se interesan los militares por la fusión? Pues porque la implosión del objetivo provocada por el láser es muy parecida a la explosión de una bomba de hidrógeno. La física de la fusión láser es semejante, si bien en menor escala, a la de la bomba de hidrógeno. El proceso de elaboración de los objetivos es muy similar al de las bombas y en realidad algunos de los diseñadores más destacados de gránulos han trabajado anteriormente en el campo bélico.

El pacto prohibitivo de pruebas nucleares no permite la explosión de bombas de hidrógeno de gran tamaño en la atmósfera; sin embargo, nada impide que los científicos realicen pruebas con sus proyectos en los laboratorios de fusión láser. Esta es una de las varias razones por las que los centros más importantes de investigación sobre fusión láser sean al mismo tiempo los laboratorios principales de armas nucleares: el laboratorio nacional Lawrence Livermore, en Livermore, California y el laboratorio nacional de Los Alamos, en Nuevo México.

Además de simular la explosión de una bomba de hidrógeno la fusión láser reproduce también sus *efectos*. Dicho procedimiento genera un intenso desprendimiento de neutrones y otras partículas subatómicas y a los investigadores militares les interesa saber la influencia que ejercen sobre diversos materiales. Estas reacciones les permiten poner a prueba la «resistencia a la radiación» de equipos bélicos sin tener que detonar una auténtica bomba. Los científicos someten el material, que se utiliza en los tanques y otros aparatos a los efectos de la fusión a pequeña escala para conocer su reacción ante un ataque nuclear.

Debido a dichas aplicaciones, parte de la tecnología relacionada con la fusión láser sigue constituyendo secreto militar. El diseño de objetivos, debido a su similitud con el de bombas, ha sido tradicionalmente un tema de alta sensibilidad y precisamente debido a ello las pruebas de ciertos modelos se han realizado exclusivamente en los laboratorios Livermore y en Los Alamos, donde se pueden tomar las medidas de seguridad necesarias. Las cosas tardan tiempo en dejar de constituir un secreto oficial. Por ejemplo las implosiones inducidas por rayos X que hemos mencionado anteriormente sólo se dieron a conocer en noviembre de 1980 durante la conferencia organizada por la Sociedad norteamericana de física, cuando en realidad los investigadores de Livermore hacía muchos años que las

estudiaban. E incluso después de dicha conferencia no se dieron a conocer los esquemas de los objetivos.



Modelo de un gránulo de fusión sobre la cabeza de un alfiler. El diámetro del gránulo es el de un cabello humano. Lawrence Livermore National Laboratory

A pesar de que hayan sido los militares quienes hayan financiado el estudio de la fusión láser, también está claro que la perspectiva de perfeccionarla para fines pacíficos es algo más que una mera promesa. El Departamento norteamericano de Energía ha patrocinado el proyecto de centrales de fusión láser y la investigación de ciertos aspectos tecnológicos necesarios para poder instalar los reactores en las centrales de fusión del siglo XXI.

ORÍGENES DE LA FUSIÓN LÁSER

La idea de la fusión por el método de confinamiento por inercia se desprendió de la investigación de los años 40 que dio origen a la bomba de hidrógeno. La posibilidad de generar reacciones de fusión con explosiones *no* nucleares fue algo en lo que al parecer se pensó al poco tiempo. La posible utilización del láser parece haber nacido con el propio invento, pero sus auténticos orígenes están sumidos en una nube de sigilo y de reivindicaciones conflictivas.

Conocemos a algunos de sus protagonistas originales. Había un grupo muy activo en el laboratorio nacional de Lawrence Livermore a principios de los años 60 entre los que se encontraba Edward Teller —generalmente considerado como el padre de la bomba de hidrógeno norteamericana— así como Raymond E. Kidder y John A. Nuckolls, todavía miembros activos de dicho laboratorio en el programa de fusión láser. Estaba también entre ellos el científico de origen alemán Friedwart Winterberg, que se había unido al Instituto de investigación del desierto de la universidad de Nevada, en Reno, donde desarrollaban independientemente estudios teóricos sin restricción alguna, si bien con cierta displicencia por parte de las autoridades gubernamentales. Algunos rusos se interesaron también por el tema. Y, por supuesto, Gordon Gould, quien por lo menos tomó en consideración la idea de utilizar láseres para excitar una fusión termonuclear, y quizá forme parte de la amplia solicitud de patente cuya complejidad se ha comentado en el capítulo cuarto.

El programa gubernamental se desarrolló con pasmosa lentitud a lo largo de los años sesenta bajo el auspicio de la Comisión de Energía Atómica. Luego pasó a menos de la Comisión del Desarrollo y de la Investigación Energética, en los años setenta, y por último a las del De-

partamento de Energía. Sin embargo, fue en 1969, bajo el control de la Comisión de Energía Atómica, cuando la fusión láser recibió su primer gran impulso.

LA AVENTURA DE KMS: VELOCES NEUTRONES Y REPENTINA MUERTE

Aquel año parecía como si la fusión láser estuviese destinada a seguir el camino de tantos programas de investigación gubernamentales, caracterizados por la paciente y callada labor de numerosos científicos en diversos laboratorios, con las correspondientes polémicas periódicas entre sus respectivos directores, funcionarios del Estado y políticos entre bastidores. La mayor parte del trabajo realizado se guardaba en secreto por razones de seguridad. Sin embargo, aquél fue también el año en que tuvo lugar un acontecimiento que, a pesar de las intermitentes protestas y exaltaciones, llegaría a convertir el programa gubernamental en algo de dominio público: Keeve M. Siegel descubrió la fusión láser.

Kip Siegel era un individuo decidido, gordete y energético, que había estado muy ocupado a lo largo de los años sesenta. Había comenzado la década como profesor de matemáticas en la universidad de Michigan, en Ann Arbor. En 1960 había abandonado la enseñanza para fundar la Conductron Corporation, empresa especializada en radar, óptica y electrónica. La empresa Conductron tuvo éxito y se unió a la McDonnell Aircraft Corporation (actualmente denominada McDonnell Douglas Corporation). Cuando en 1967 decidió abandonar Conductron a raíz de una discusión con el presidente de McDonnell, James S. McDonnell, Siegel había convertido su inversión inicial de 12.000 dólares en 4 millones de dólares.

A los pocos días había conseguido un nuevo empleo, en esta ocasión como director gerente de su propia empresa que denominó (haciendo gala de su poca modestia) KMS Industries Inc. Y entonces, en lugar de ampliar su compañía, utilizó una nueva táctica consistente en adquirir pequeñas empresas (que pagaba con acciones de la KMS) para construir un conglomerado industrial. Generalmente adquiría viejas compañías que actualizaba con tecnología moderna. El crecimiento fue rápido. Durante el primer año las ventas de la KMS alcanzaron los 13 millones de dólares y en el segundo los 59 millones. A lo largo de 1969 adquirió 32 empresas

de muy diversa índole, desde editoriales hasta fábricas de aparatos ópticos.

Fue entonces cuando Siegel quedó cautivado por el encanto de la fusión láser. Sabía perfectamente que no podía competir con los inmensos recursos del Estado, pero estaba convencido de que un reducido grupo de científicos inteligentes y voluntariosos podría conseguir mejores resultados que los investigadores que trabajaban en los laboratorios del Gobierno. Creía que la industria privada podía perfeccionar ciertos conceptos fundamentales de la fusión láser de modo que además fuese rentable. La idea es anticuada y en la actualidad nos recuerda la ciencia-ficción.

La tecnología estaba todavía protegida por normas de seguridad y la KMS se vio obligada a solicitar el permiso de la Comisión de energía atómica para poder emprender la investigación de la fusión láser. Tuvieron lugar prolongadas negociaciones; finalmente, en 1971, consiguió el permiso necesario para dedicarse a la anhelada investigación.

Para los estudios que emprendió sobre la fusión láser logró ganarse el apoyo de otras empresas entre las que cabe destacar la Texas Gas Transmission Corporation y la Burmah Oil Corporation, aunque la mayor parte de los fondos dedicados a la investigación procedieron de la venta de los demás negocios de la compañía. En total fueron muchos millones los que invirtieron entre la KMS y sus asociados en dicho proyecto.

Siegel sólo realizó parte de su sueño. Se estableció una competición entre su empresa y los laboratorios nacionales de Livermore y Los Alamos, empeñados todos ellos en ser los primeros en demostrar el proceso de fusión de un modo convincente. La meta que perseguían era la producción de neutrones energéticos y pasó a denominarse «la carrera de los neutrones».

KMS fue el vencedor a principios de 1974. Unos pocos neutrones habían sido observados en experimentos anteriores en otros lugares, pero nunca se habían disipado las dudas sobre si su presencia era debida a la fusión o a cualquier otro proceso. Con la ayuda de haces de luz láser para provocar la implosión de gránulos de deuterio y tritio, en su primer experimento logró producir 300.000 neutrones del tipo que normalmente debía generar la fusión. Transcurridos apenas unos meses y por medio de pulsaciones láser cuya energía era tan sólo el 60 por ciento superior a la del experimento anterior fue capaz de producir siete millones de neutrones.

Pero aquello no fue más que la primera etapa de una maratón con mucho camino todavía por recorrer antes de que la fusión láser se convierta en una proposición práctica. A principios de 1975 comenzó a quedarse sin dinero y, con el fin de solicitar ayuda económica a la Comisión del Desarrollo y de la Investigación Energética, en marzo del mismo año Kip Siegel se trasladó a Washington para declarar ante el Congreso.

En plena declaración, al habitualmente persuasivo Siegel se le trababa la lengua. Dejó de hablar para tomar un sorbo de agua y, antes de desplomarse, susurró algo de «infarto». Al día siguiente había fallecido. Tenía 52 años.

El Gobierno otorgó una serie de contratos a corto plazo a la KMS para llevar a cabo investigación sobre la fusión, pero los problemas persistieron. Si bien la empresa subsidiaria KMS Fusión Inc., donde se realizaba la investigación en cuestión, logró sobrevivir, la compañía central quedó sin fondos en 1976 y cerró las puertas en espera de nuevos inversionistas.

Hasta 1978 la empresa no logró estabilizarse definitivamente. Consiguió que el Departamento de Energía le otorgase un contrato a largo plazo, con el consiguiente alivio ante la incertidumbre crónica que abruma a quienes malviven gracias a contratos gubernamentales a corto plazo. Además, encontró un grupo de inversionistas que aportaron un millón de dólares a la KMS a cambio de un 20 por ciento de las acciones de la empresa. Pero transcurrió algún tiempo antes de que se solventase cierto problema que preocupaba al Departamento de Energía: el hecho de que el presidente del grupo de inversionistas fuese John E. Long, de Edmonton, Canadá. A los funcionarios estatales les preocupaba que un proyecto de investigación tan delicado como el de la fusión láser estuviese en manos de una empresa dirigida por un ciudadano canadiense. Con el fin de aplacar sus temores, Patrick, hermano de Long y abogado de Chicago que gozaba de la nacionalidad norteamericana, fue nombrado presidente de la KMS.

SHIVA, NOVA Y HELIOS

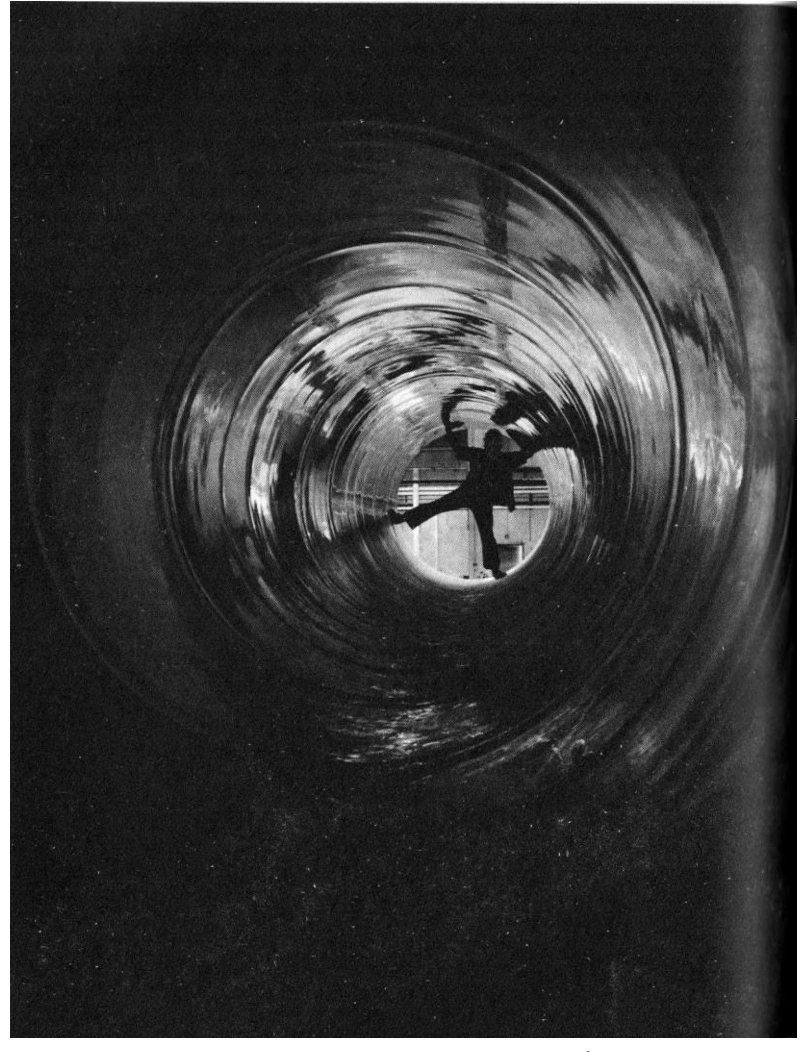
La KMS está todavía en posesión de varias patentes relacionadas con la fusión láser y desarrolla programas de investigación para el Departa-

mento de Energía. Pero en la actualidad los programas de mayor envergadura son los de los laboratorios nacionales de Livermore y Los Alamos. Para sus respectivos programas de investigación cada uno dispone de un láser de grandes dimensiones y construyen otros todavía mayores con el fin de averiguar la importante cuestión de la «escalada» de la potencia láser, es decir, qué se gana aumentando la potencia de los láseres para producir la fusión.

El director del programa de Livermore es John Emmett, físico influyente, aunque en ocasiones polémico, que ha aportado el entusiasmo necesario para que la investigación sobre la fusión láser siga adelante. En Livermore utilizan láseres de cristal de neodimio para provocar la implosión de los objetivos y obtienen una cantidad de neutrones muy superior a la de los primeros experimentos de la KMS (donde también utilizaban láseres de cristal de neodimio), si bien los científicos han dejado de basarse exclusivamente en la cantidad de neutrones producidos para medir los resultados de sus experimentos.

El mayor láser con el que cuentan en Livermore es el denominado Shiva. Cada uno de sus veinte brazos es en realidad una línea de amplificadores láser que incrementan la potencia de una sola pulsación producida por un oscilador láser de alta precisión y dividida a continuación en veinte derivaciones. Los brazos están alineados y ajustados meticulosamente (con la ayuda de un equipo de computadoras) de forma que las pulsaciones que pasen por cada uno de ellos lleguen al objetivo exactamente al mismo tiempo. Cada brazo ilumina un sector diferente del objetivo con el fin de procurar conseguir una iluminación uniforme que produzca una implosión simétrica.

Shiva descarga una pulsación de unos 10.000 julios sobre su blanco, equivalente sólo a una energía aproximada a 0,003 kilovatios-hora, suficiente para mantener una bombilla de 60 vatios encendida durante 3 minutos. Sin embargo, la descarga sobre el blanco, cuyo diámetro es de unas décimas de milímetro, dura escasamente una mil millonésima de segundo. La potencia máxima de Shiva es de 30 billones de vatios, pero en tal caso la duración de la pulsación sería de unas 0,2 mil millonésimas de segundo. Dicha potencia sería 30.000 veces superior a la de una central nuclear de gran capacidad, pero mientras que la potencia de la central sería constante la del láser duraría sólo una fracción de una mil millonésima de segundo.



Un operario se balancea al extremo del tubo por el que pasarán doce de los haces de salida del equipo láser de Antares que se construye actualmente en Los Alamos. Cuando esté completo, constará de dos tubos similares, con un total de 24 haces. Los Alamos National Laboratory

En Livermore han comenzado ya a construir su nuevo láser llamado Nova. Se trata de un proyecto sumamente ambicioso cuyo coste global será de unos 200 millones de dólares y que ha sido planificado en dos etapas. Durante la primera se construirán diez brazos, con sus correspondientes despachos y laboratorios, capaces de producir 100.000 julios en una tres mil millonésima de segundo. Cuando esté concluida dicha parte se instalarán otros diez brazos en el edificio actualmente ocupado por Shiva. Se calcula finalizar su construcción a mediados de los años 80 y su potencia total será de 200.000 a 300.000 julios para pulsaciones de igual duración.

En Los Alamos dedican mayor interés a los láseres de dióxido de carbono que a los de cristal de neodimio y disponen ya de un instrumento denominado Helios con ocho brazos paralelos cuya energía es similar a la de Shiva, si bien su potencia máxima es algo inferior debido a que sus pulsaciones son de mayor duración.

En 1983 confían en poner en funcionamiento un nuevo láser de dióxido de carbono llamado Antares, en honor a la gigantesca estrella del mismo nombre que es uno de los veinte astros de mayor brillo en el cielo veraniego. Este descomunal instrumento producirá pulsaciones de 40.000 julios en una mil millonésima de segundo de duración, correspondientes a una potencia total de 40 billones de vatios. Su energía estará dividida entre 24 haces independientes.

PROGRAMAS DE FUSIÓN EN ALGUNOS PAÍSES

Los proyectos de Livermore y Los Alamos son los más importantes de Norteamérica, pero existen otros además del de la KMS. En Los Alamos se estudia la fusión por confinamiento por inercia con haces de iones, y se desarrollan programas similares en los laboratorios nacionales de Sandia, en Albuquerque, Nuevo México, en el laboratorio nacional de Argonne, de Illinois, y en el Lawrence Berkeley, de Berkeley, California. Estudios de fusión por láser se llevan a cabo en el laboratorio de investigación de la Marina en Washington DC y en el laboratorio de energía del láser de la universidad de Rochester, en Nueva York. Cada uno de dichos laboratorios dispone de un láser de gran tamaño para realizar sus experimentos y todos reciben ayuda del Departamento de Energía. A excepción

de la universidad de Rochester, cuya financiación procede en gran parte de la industria privada y se ha propuesto explícitamente permitir que experimenten con láseres de alta potencia investigadores no gubernamentales, las demás organizaciones están sujetas a ciertas normas de seguridad.

Por otra parte, Estados Unidos no es el único país donde se investiga sobre la fusión láser. Inglaterra, Francia, Japón, Australia, China y la Unión Soviética cuentan también con programas de considerable envergadura. Aunque no todos, la mayor parte de los estudios que se llevan a cabo en Inglaterra y Francia tienen objetivos militares, por lo que están bajo secreto, mientras que en Japón y Australia la investigación parece estar financiada casi totalmente por organismos civiles.

El proyecto chino comenzó en 1965 y sus avances son impresionantes, particularmente si tenemos en cuenta el poco contacto que China ha mantenido con el mundo exterior durante muchos años. El programa que desarrollan en el Instituto óptico y de mecánica de precisión en Shanghai lleva tan sólo unos pocos años de retraso con relación a los más avanzados, de Estados Unidos, según declaraciones de Stephen E. Bodner y Barrett H. Ripin, investigadores destacados del programa de fusión láser del laboratorio de la Marina norteamericana, a raíz de su visita a China en 1980. Los chinos no cuentan con el apoyo industrial de otras naciones y frecuentemente se ven obligados a construir sus propios instrumentos, pero trabajan muchísimo, aprenden con rapidez y se adaptan a las nuevas circunstancias cuando éstas lo requieren.

El programa soviético de fusión, con confinamiento por inercia, es un tanto enigmático. Cuentan con dos grandes láseres de cristal en el Instituto de física de Lebedev, en Moscú, cada uno de ellos a disposición de uno de los dos científicos que recibieron el premio Nobel por su contribución al desarrollo del láser. El equipo encabezado por Nikolai Basov ha utilizado su aparato y la prensa rusa ha publicado algunos resultados de los experimentos. Pero según el testimonio de ciertos científicos estadounidenses que visitaron Rusia en 1980, el grupo de Aleksander Projorov ni siquiera había realizado las instalaciones preliminares del suyo.

Los soviéticos parecen dedicar la mayor parte de sus esfuerzos al uso poco común de haces de electrones o iones. En lugar de dirigir dicho haz contra un objetivo, hacen que atraviese un cilindro metalizado y las fuerzas electromagnéticas generadas por dicho haz provocan la implosión del

cilindro. Los científicos norteamericanos dudan de que dicho sistema pueda ser utilizado para generar electricidad con fines comerciales, pero los investigadores de Sandia realizan experimentos similares con fines bélicos. A pesar de que los rusos aseguran que les preocupa el aspecto civil, lo más probable es que la mayor parte de su investigación esté dirigida a fines militares.

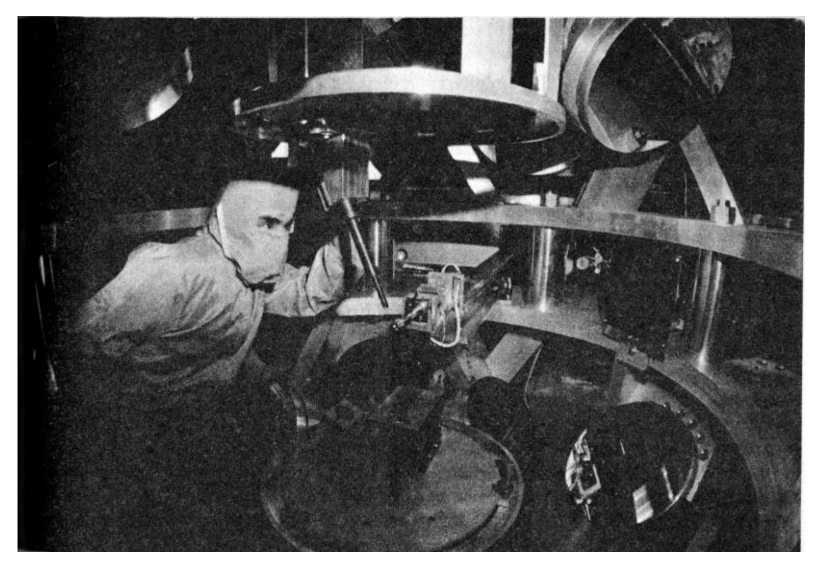
EL LÁSER DE FUSIÓN «IDEAL»

Existe en la actualidad una apasionada polémica sobre el tipo más idóneo de láser para la fusión. El problema técnico primordial consiste en encontrar un láser que no sólo sea lo suficientemente potente sino que, además, su longitud de onda sea la apropiada para provocar la implosión con el sistema de confinamiento por inercia. La solución no está a la vista.

El láser de dióxido de carbono utilizado en Los Alamos emite luz infrarroja de 10,6 micrómetros y todavía no se sabe con certeza si en dicha longitud de onda es posible transferir con la eficacia necesaria suficiente energía al plasma que se forma cuando el haz alcanza el objetivo. Esta es precisamente la cuestión que intentan averiguar en Antares. Los láseres de dióxido de carbono son eficaces y están muy perfeccionados, pero su utilidad será nula si no logran transferir su energía al objetivo.

El problema de estos láseres estriba en que emiten longitudes de onda relativamente largas y se cree que las de menor longitud son más idóneas. La luz empleada en Livermore, la del láser de cristal de neodimio, es de 1,06 micrómetros, en la región del infrarrojo cercano, al lado de la gama visible. Además, para fines experimentales es posible dividir su longitud por dos, tres o incluso cuatro, utilizando ciertos cristales especiales.

La implosión del gránulo de deuterio y tritio que hemos descrito al principio de este capítulo fue provocada por un láser de cristal de neodimio, pero recordemos que fue tan sólo un experimento. En realidad dicho instrumento carecería de utilidad en una central comercial donde tuviese que disparar su haz repetidamente. Su eficacia es limitada y necesita varias horas para enfriarse después de cada pulsación, además de ser excesivamente caro y voluminoso.



Un operario revisa la cámara del objetivo de Helios, el mayor láser de fusión de dióxido de carbono del mundo. El objetivo sobre el que los ocho haces de Helios convergen se coloca en el centro de dicha cámara. Los Alamos National Laboratory

Por consiguiente es preciso descubrir otro tipo de láser que, a pesar de la copiosa investigación, nadie ha encontrado todavía. En realidad, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha puntualizado que el fin de su investigación es la fusión por el sistema de confinamiento por inercia, y no solamente con láser. Esto significa que los láseres se ven obligados a competir con los haces de iones y electrones que también pueden ser utilizados para generar implosiones en el método de confinamiento por inercia. (Un investigador de Livermore llamado John Nuckolls ha llegado a proponer que se bombardease el objetivo directamente con pequeños proyectiles.) El apoyo del programa de los haces de iones va en aumento. Lawrence Killion, del Departamento de Energía, con ocasión de una conferencia sobre la fusión por el sistema de confinamiento por inercia, declaró: «no podemos seguir pensando que los láseres constituyen la opción dominante». Frase altamente amenazadora si se tiene en cuenta que su autor es el director de la división de fusión

láser de la oficina de fusión por el sistema de confinamiento por inercia del Departamento de Energía.

OBJETIVO: IGNICIÓN

La razón de dicha amenaza la constituyen una serie de problemas técnicos que han hecho que el Departamento de Energía dejase de apoyar el programa de fusión láser que inicialmente se consideraba esencial por el hecho de no haber logrado hasta estos momentos producir una cantidad de energía de fusión similar a la utilizada para provocar la implosión del objetivo. Actualmente se ha definido una nueva meta: la «ignición», que supone la tarea menos ardua de obtener la *densidad* necesaria para igualar la energía invertida y la conseguida, sin necesidad de calentar el plasma a las altas temperaturas requeridas por el objetivo anterior.

La igualdad de energía es una meta esencial y en la actualidad la cantidad utilizada por los láseres es superior a la obtenida. No hay que ser un genio matemático para comprender que el proceso debería operar a la inversa. El problema estriba en que la cantidad de energía láser que se supone que será necesaria para llegar a igualar la de salida «se ha disparado hacia arriba más que el oro», según confesó A. Nuckolls, director de física teórica en la división de fusión láser de Livermore y destacado proyectista de objetivos. Claro que hizo esta afirmación en la reunión que tuvo lugar en febrero de 1980, cuando el precio del oro había alcanzado el límite máximo conocido en la historia; en las semanas siguientes descendió considerablemente. Por desgracia no se mantuvo el paralelismo. La previsión de energía láser necesaria para igualar la producida siguió siendo del orden de los 300.000 julios, cuando en otra época se había pensado en la módica cifra de 100 julios.

En la misma reunión, Nuckolls subrayó otro problema: la incapacidad de varios laboratorios dedicados al estudio de la fusión por el procedimiento de confinamiento por inercia para cooperar entre sí. «El programa carecerá de toda posibilidad de éxito hasta que sus respectivos directores no aprendan a superar dicho inconveniente», afirmó. Otro problema lo constituye la tendencia de ciertos laboratorios que, con el fin de conseguir la ayuda del Congreso para sus respectivos programas critican los de los demás. Esto no es sino un reflejo de las continuas reducciones del

presupuesto, que las rebajas propuestas por la administración Reagan, todavía sin decidir en el momento de escribir estas líneas, amenazan con recrudecerse.

El hecho de que la energía necesaria para igualar la de salida sea muy superior a lo que se creía, significa que el equipo Nova de Livermore posiblemente no tenga la potencia necesaria, si bien nadie está seguro de ello. No obstante lo más probable es que no tenga dificultad alguna en alcanzar la meta menos ambiciosa que representa la ignición.

El próximo problema es que, cuando se haya resuelto la cuestión de la ignición, la mayoría de los objetivos bélicos habrán sido alcanzados y entonces los militares quizá decidan construir su propio laboratorio de fusión láser para sus fines. En tal caso los programas destinados al perfeccionamiento de la fusión láser para fines civiles cesarán o se verán obligados a sobrevivir por sus propios medios. En el caso de que lo logren más allá de la ignición y de la igualdad de energías, la próxima etapa la constituirá la igualdad desde el punto de vista de la ingeniería, es decir el momento en que la cantidad total de energía generada por la fusión del gránulo sea equivalente a la totalidad de la energía empleada para provocarla, que en realidad es muy superior a la del haz debido a la baja eficacia del láser. Los partidarios del láser se contentarían con pequeños porcentajes de rendimiento; y sin embargo los que trabajan en el campo de la fusión por el procedimiento de confinamiento por inercia con haces de partículas esperan que la rentabilidad de su proyecto llegue a ser del orden del 15 al 25 por ciento.

LA ÚLTIMA ETAPA: LA CENTRAL ELÉCTRICA

Tras alcanzar la igualdad global de energía, la siguiente etapa consistiría en construir algún prototipo de reactor de fusión que generase pequeñas cantidades de energía probablemente en forma de electricidad. Sólo cuando se hayan sobrepasado todas estas etapas se estará en condiciones de construir el primer reactor de fusión láser a gran escala, lo cual probablemente no ocurrió hasta el próximo siglo.

Los diseñadores han pensado ya en la forma de dicha central. Uno de sus elementos lo constituiría probablemente litio en estado líquido para transferir energía y generar tritio, el isotopo de hidrógeno radioactivo que

según se supone será uno de los combustibles utilizados por la primera generación de centrales de fusión láser. Debería además ser capaz de soportar repetidas ondas explosivas y eliminar con rapidez la totalidad del material de desecho de la cámara del objetivo, antes de que tuviese lugar la implosión del siguiente gránulo.

Constituirá sin duda un problema descomunal para los ingenieros.

ENRIQUECIMIENTO DEL URANIO

La fusión es naturalmente el uso más espectacular de los láseres en el campo de la energía; sin embargo, oculta a la sombra de dichos programas se encuentra la perspectiva mucho más inmediata de su utilización para el *enriquecimiento* del uranio destinado a los reactores de *fisión* nuclear.

A pesar de que en teoría se podría producir energía desintegrando cualquier tipo de átomo de uranio, en la práctica sólo se utiliza un isótopo determinado que es el denominado uranio-235. Se trata de un isótopo poco común, que constituye tan solo el 0,7 por ciento del mineral en estado natural y prácticamente la totalidad del resto consiste en uranio-238 que no se desintegra bajo las condiciones de bombardeo neutrónico que imperan en los reactores de fisión nuclear.

El problema estriba en que la concentración natural de uranio-235 no es lo suficientemente elevada para los reactores de «agua ligera» utilizados en Estados Unidos y en el resto del mundo, que requieren concentraciones del orden del 3 al 4 por ciento a fin de mantener una *reacción en cadena* en la que se desintegran ininterrumpidamente los núcleos del uranio-235 produciendo neutrones que destruyan otros núcleos del mismo isótopo, y así sucesivamente. Las concentraciones necesarias para las bombas son todavía más elevadas. (El uranio natural puede ser utilizado en el reactor de construcción canadiense denominado CANDU que funciona con agua pesada, es decir, que contiene deuterio en lugar de hidrógeno-1. No existe ningún reactor de este tipo en Estados Unidos.)

La separación de isótopos de un mismo elemento supone una descomunal tarea. El procedimiento más antiguo para el enriquecimiento del uranio es el conocido como *difusión gaseosa*, que se basa en el hecho de que a temperatura constante las moléculas y los átomos más ligeros se

desplazan con mayor rapidez que los más pesados, a una velocidad inversamente proporcional a la de sus respectivos pesos. Evidentemente dicho procedimiento sólo puede practicarse en un medio gaseoso y, puesto que el uranio es sólido, se usa hexafluoruro de uranio que se convierte en gas a 56° centígrados.

El proceso de difusión gaseosa obtiene buenos resultados, y en realidad es casi el único que se utiliza en Estados Unidos para el enriquecimiento del uranio. Sin embargo es muy caro. Las plantas de difusión gaseosa son tan enormes (generalmente de más de una hectárea) que los empleados se desplazan por sus pasillos en coche o en bicicleta. Además, todas ellas deben disponer de su propia central eléctrica y consumen centenares de millones de dólares anualmente. Su coste global es de miles de millones de dólares. Por otra parte su eficacia es limitada, y aproximadamente un tercio del uranio-235 permanece mezclado con el material de desecho.

Es preciso descubrir una nueva tecnología, y la predilecta para el futuro inmediato la constituye la *centrifugación* del gas, basada también en las diferencias de peso entre los isótopos de uranio. El Departamento de Energía se propone construir un prototipo que entre en funcionamiento durante el transcurso de la presente década. Se trata de un proyecto bastante costoso —más de mil millones de dólares—, pero, en igualdad de producción, sólo utilizará el 10 por ciento de la energía consumida por las plantas de difusión gaseosa.

Bien, pues a pesar de todo, algunos científicos creen que es posible mejorar los resultados: con el láser, claro está. Gracias a su facultad de poder excitar un sólo isótopo de un elemento único (o sólo las moléculas que contengan dicho isótopo), y hacer que los átomos (o las moléculas) excitados correspondientes a los isótopos elegidos, reaccionen químicamente con otras sustancias, con el fin de separarlos del material que no interese.

Puede que el enriquecimiento de isótopos por láser parezca sencillo en teoría, pero es sumamente complejo en la práctica. Un procedimiento que se estudia en el laboratorio nacional de Lawrence Livermore es el sistema «atómico» que precisa uranio en forma de vapor. Lamentablemente, la vaporización del uranio exige temperaturas extremadamente elevadas. Además, como si las altas temperaturas no creasen ya un pro-

blema de suficiente magnitud, el vapor de uranio es extremadamente peligroso, corrosivo... y, evidentemente, radiactivo.

Muchos de los detalles de dicho proceso no se comentan en público, pero la idea básica consiste en sintonizar un láser que emita luz en la gama visible (o casi visible) del espectro, en la longitud de onda precisa para que sea absorbida por el uranio-235 y, una vez excitado, ionizarlo con otro láser o hacer que reaccione químicamente con otro material.

Otro procedimiento en que interviene el láser, el «molecular», es el que investigan en el laboratorio nacional de Los Alamos, para el cual utilizan hexafluoruro de uranio u otro compuesto parecido. En él, las moléculas que contienen uranio-235 son excitadas selectivamente por medio de un láser cuidadosamente sintonizado en una longitud de onda de la región infrarroja. A continuación iluminan el hexafluoruro de uranio con otro láser que emite luz ultravioleta y transmite la suficiente cantidad de energía para liberar un átomo de flúor de las moléculas excitadas que contienen los átomos de uranio-235. De ese modo no resulta difícil separar las moléculas de pentafluoruro de uranio de las hexafluoruro de uranio, debido a que tanto sus propiedades químicas como su temperatura de licuefacción son diferentes.

Los procedimientos «atómicos» y «molecular» tienen dos aspectos sumamente importantes en común. En teoría, consumen muy poca energía por átomo de uranio-235 aislado, debido a que el láser excita exclusivamente los preciosos isótopos. Esta ventaja compensa la baja eficacia de algunos de los láseres utilizados.

Otra mejora es la alta sensibilidad de ambos procedimientos. Los láseres son sumamente eficaces para localizar el uranio-235, lo que debería permitir que su proporción en los residuos se redujese al 0,05 a 0,08 por ciento, es decir aproximadamente el 10% del 0,7 natural. Cabe señalar que entre los residuos de las plantas de difusión gaseosa se encuentra del 0,25 al 0,30 por ciento de uranio-235. En realidad una de las razones primordiales por las que el Departamento de Energía se interesa por el procedimiento láser es la posibilidad de recuperar el uranio-235 que actualmente se encuentra entre las enormes cantidades de productos sobrantes procedentes de las plantas de difusión gaseosa. El uso del láser podría incrementar de una forma efectiva las existencias en un 30 o 40 por ciento.

Pero existen también problemas muy considerables. El procedimiento de vapor mencionado anteriormente supone la manipulación de uranio atómico vaporizado que es sumamente peligroso. Para el proceso molecular es preciso perfeccionar un láser infrarrojo adecuado que todavía no existe en la realidad. Asimismo, en ambos procedimientos es necesario disponer de un segundo láser para liberar un átomo de las moléculas excitadas o un electrón de los átomos excitados. Y ni una cosa ni la otra es tan simple como parece.

Los procedimientos láser son dos de los tres proyectos destinados a la separación de isótopos que estudia el Departamento de Energía. (El tercero, en el que no se utiliza láser alguno, se desarrolla en la TRW Inc.) El Departamento de Energía espera decidirse por uno de ellos y abandonar los demás.

PROBLEMAS DE PROLIFERACIÓN

Hasta estos momentos no hemos hablado todavía del aspecto más delicado e importante del enriquecimiento de uranio por medio del láser: la proliferación nuclear.

El problema estriba en que la tecnología para el enriquecimiento de uranio ha constituido el grifo que ha contribuido a limitar el desarrollo de armas nucleares. No es difícil extraer uranio de las minas y refinarlo para convertirlo en óxido de uranio o incluso en metal puro. Tampoco es desesperadamente difícil diseñar una bomba atómica de fisión (un estudiante de la universidad de Princeton lo logró hace pocos años). Sin embargo con la actual tecnología es sumamente difícil enriquecer el contenido de uranio-235 con el fin de que su concentración sea lo suficientemente elevada para construir una bomba.

Tanto el procedimiento de difusión gaseosa como el de centrifugación son difíciles, complejos y caros de aplicar. En estos momentos el método de vaporización atómica y el de enriquecimiento molecular de isótopos por láser parecen también de difícil ejecución, por cuanto la tecnología requerida no es fácilmente accesible.

¿Podría algún descubrimiento inesperado en la tecnología láser derribar dicha barrera y abrir el camino de la proliferación nuclear? Posiblemente, pero lo más probable es que no ocurra. Sería preciso que coinci-

diesen unas condiciones físicas favorables con la suerte —o la desgracia según el punto de vista desde el que se mire— de que se lograse que la longitud de onda de salida del láser correspondiese a la de máxima absorción del uranio. En tal caso, probablemente sólo sería aplicable al proceso molecular, puesto que, por ahora, no hay forma de lograr que el problema que presenta el manejo del uranio atómico vaporizado desaparezca. Existe, sin embargo, la posibilidad teórica de logarlo y ésta es la razón por la cual el programa de enriquecimiento molecular que tiene lugar en Los Alamos esté protegido por rigurosísimas normas de seguridad.

Tanto en Los Alamos como en Livermore han producido cantidades macroscópicas —es decir, visibles— de uranio enriquecido, pero ni un procedimiento ni el otro están todavía en condiciones de ser utilizados en la práctica. Deben transcurrir muchos años para solucionar los problemas técnicos y es altamente improbable que ninguno de ellos comience a enriquecer uranio antes del fin de esta década.

Entretanto, los científicos que investigan acerca del enriquecimiento de isótopos intentan aplicar la misma tecnología láser a la purificación del plutonio que se produce en los reactores nucleares. Puede que los problemas de proliferación de dicho método sean todavía más graves que los del uranio enriquecido, puesto que su meta parece ser la producción de material adecuado para la construcción de bombas. En los reactores de fisión, los neutrones libres convierten parte del uranio-238 en plutonio-239, que al igual que el uranio-235 puede ser desintegrado por neutrones en una bomba o en un reactor. En la práctica se produce además una cantidad de otros isótopos lo suficientemente elevada como para que no se pueda utilizar dicho plutonio en las bombas (donde la pureza necesaria es superior a la de los reactores), pero ahora el Departamento de Energía intenta servirse de láseres para separar los isótopos contaminantes.

LOS SATÉLITES DE ENERGÍA SOLAR

Una de las ideas para solucionar el problema de la energía más espectaculares de los últimos tiempos es la de lanzar un satélite de energía solar. Se colocaría en una órbita geosincrónica, por lo que su posición

parecería estacionaria sobre un punto del ecuador y acumularía energía solar para trasmitirla a la Tierra.

Las favoritas para la transmisión de dicha energía son las microondas. Si bien capaces, por lo menos en teoría, de realizar la tarea en cuestión, habría que resolver antes algunos problemas. El principal lo constituye las grandes dimensiones del terreno necesario (unos 200 km) para la instalación de un receptor de microondas, mientras que un receptor láser podría realizar la misma función en sólo un kilómetro cuadrado. Y otros problemas son las posibles interferencias con los servicios de comunicación, cuya dependencia en las transmisiones por microondas va en aumento, así como graves incertidumbres relacionadas con los peligros que dichas ondas podrían presentar para la vida humana. Uno de los partidarios del láser se preguntaba muy en serio: «¿Deseamos realmente convertir la atmósfera en un horno de microondas?»

Los láseres presentan también sus propios problemas. Si bien la alta densidad de la energía permitiría que el receptor fuese de menores dimensiones, cabe preocuparse por los efectos que podría causar una posible desviación del haz de luz. En realidad, su potencia sería superior a la requerida para fines bélicos, pero podría prescindir de los delicados sistemas direccionales que precisan las armas, puesto que se dirigiría hacia un objetivo dispuesto a cooperar, que sería la estación receptora. Tampoco sería necesario focalizar el haz sobre un pequeño punto. No obstante, llegar a la certeza de que no se utilicen los láseres para transmitir energía en beneficio de alguna función bélica puede presentar problemas de control de armamento muy interesantes.

Por el momento dichas consideraciones son puramente teóricas. Los partidarios de la colonización del espacio y del programa espacial ampliamente mejorado recibieron la idea del satélite de energía solar con tal entusiasmo que, en 1979, Donald Callahan, uno de los directores del programa desarrollado por la Administración espacial y de aeronáutica nacional, llegó a denominarlo el «Fútbol político». Al año siguiente intervino el Congreso y canceló todas las subvenciones destinadas al estudio del satélite de energía solar.

11. LOS LASERES APRENDEN A LEER Y ESCRIBIR

En los envoltorios de muchos artículos de supermercado aparecen unas rayas destinadas a que la cajera no tenga que comprobar el precio y marcarlo en la caja de registro. Al abrir la correspondencia es fácil encontrarse con documentos bancarios o de compañías de seguros, redactados por computadores e impresos por láser. Echemos una ojeada a los principales periódicos del mundo, entre otros el *New York Times* y el *Los Angeles Times,* y las páginas que tendremos ante nosotros quizás hayan sido impresas con planchas grabadas con láser.

Estas son algunas de las aplicaciones del láser en el campo de la información que nos afectan más directamente, pero existen muchas otras. En realidad todo gira alrededor de la computadora que ha revolucionado la forma de procesar la información. El atasco ya no se forma durante el análisis y el cálculo de datos. Ahora el límite viene dado por la velocidad con que logremos facilitar a —y extraer de— la computadora la información necesaria, es decir, las velocidades de input (entrada) y de output (salida), dicho en la jerga de los robots modernos. Por consiguiente, los técnicos han decidido inclinarse por la producción de láseres que puedan leer y escribir las entradas y las salidas de las computadoras y que tienen mil aplicaciones, que van desde descifrar los símbolos crípticos de las latas de sopa hasta el almacenaje, en discos reducidísimos, de información que podrá ser utilizada por las computadoras cuando lo deseemos.

Para todas estas aplicaciones el aspecto más atractivo desde el punto de vista de la técnica del láser es el hecho de poder focalizar el haz de luz sobre un punto cuyo diámetro no exceda 0,001 mm, lo que supone una dimensión muy inferior a la de cualquier otra fuente luminosa.

Al barrer una superficie con dicho punto diminuto y analizar la cantidad de luz reflejada por el mismo pueden interpretarse ciertos símbolos e incluso letras. Si se modula la intensidad del láser mientras se desplaza por la superficie de algún material sensible a la luz, será también capaz de escribir sobre dicho material a grandes velocidades. Lo que hace en realidad el láser son pequeños agujeros sobre un material especial de grabación que corresponde a los «unos» y «ceros» conque las computadoras digitales piensan.

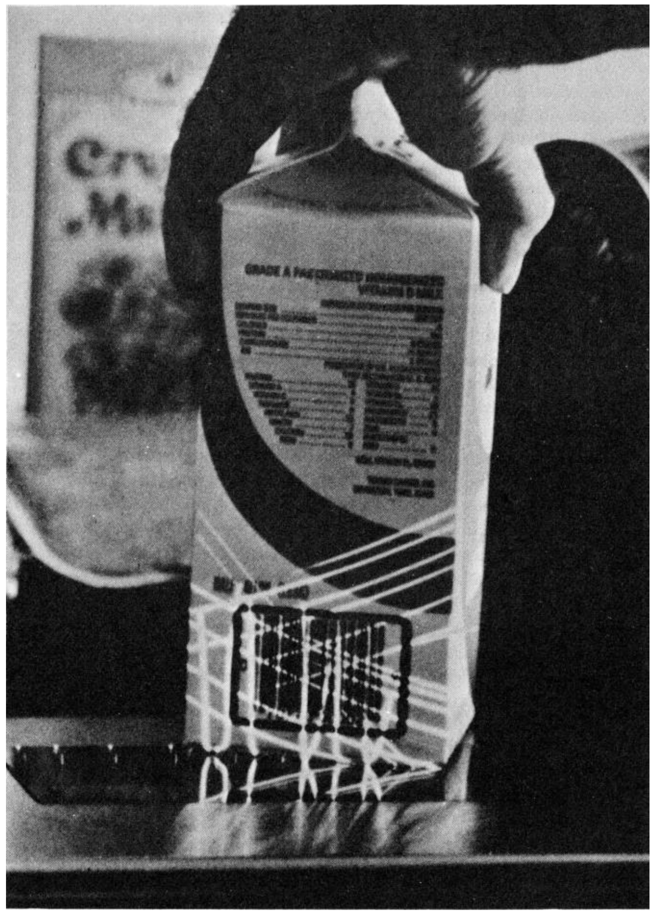
Los láseres desempeñan numerosas labores informativas de gran complejidad. Las imágenes de altísima definición procedentes de los satélites LANDSAT de la NASA son grabadas por un equipo especial de láser. Las memorias ópticas basadas en el láser llegarán probablemente a almacenar decenas de miles de millones de *bits* (unidad fundamental de información correspondiente a cero o uno) a un coste muy inferior al de otros sistemas de memoria. Las computadoras ópticas son capaces de realizar ciertas funciones con mucha mayor facilidad que las convencionales. Y en las oficinas del futuro habrá seguramente una máquina fundamental que consistirá en una combinación de fotocopiadora e impresora láser adaptada a una computadora y capaz de transmitir, recibir y generar innumerables páginas impresas.

CÓDIGO UNIVERSAL DE LOS PRODUCTOS

La serie de líneas que aparecen en los envases y paquetes de los supermercados de Estados Unidos se denomina Código universal de los productos (CUP).

Fue adoptado a mediados de 1973 por el Instituto de los supermercados para facilitar el desarrollo de los sistemas computarizados, de forma que en la caja de registro, sin necesidad de pulsar botón alguno, se pudiesen comprobar automáticamente las mercancías adquiridas.

En principio la idea es sencilla. Sobre cada producto preempaquetado se han impreso ciertos signos codificados; por ejemplo sobre las latas de sopa de tomate marca Campbell de un tamaño determinado aparecen unas líneas que corresponden al número 51000-00011, mientras que en las de sopa de pollo y verduras de la misma marca y tamaño aparecen otros signos correspondientes a 51000-00117. Al variar el tamaño cambia también el número codificado. Las cinco primeras cifras identifican al fabricante y las restantes al artículo. Tras leer los signos de la etiqueta, la computadora busca el precio correspondiente en su memoria, donde lo ha mandado poner el gerente con antelación (y si alguna vez ese precio no coincide con el que aparece en cifras convencionales sobre el artículo en cuestión, eso suele ser debido a errores imputables al establecimiento). La computadora suma automáticamente el precio de todas las compras y calcula el importe global.



Un láser holográfico explora con su haz la etiqueta CUP de un envase de leche de litro. Automáticamente el precio del artículo aparece en la caja registradora, y se sustrae el litro de leche de las existencias. International Business Machines Corporation

Una ventaja evidente de dicho sistema es la de acelerar el paso por la caja. Cuando el cajero se encuentra con un artículo que lleva un CUP en

la etiqueta no tiene más que mostrarlo al sistema explorador láser y colocarlo directamente en la bolsa, sin necesidad de pulsar botón alguno.

Aunque no tan evidente, otra gran ventaja la tenemos en la cuestión del inventario. La computadora puede controlar automáticamente los artículos vendidos y pasar a los proveedores los pedidos correspondientes a medida que disminuyan las existencias. (Es necesario comprobar periódicamente si la información de la computadora se corresponde con la de las estanterías, en especial si existe el problema del robo, aunque dichas verificaciones no deben realizarse con tanta frecuencia como los inventarios convencionales.) Gracias al láser también se evitan los errores cometidos por las prisas de los empleados, prisas que, según la industria de los supermercados, suelen favorecer al cliente. Finalmente —y en teoría— elimina la necesidad de marcar cada artículo con su respectivo precio, a pesar de que esto es algo que muy pocos establecimientos han logrado poner en práctica debido a razones que comentaremos más adelante.

El formato lineal del CUP refleja muchos factores tecnológicos. Con el fin de que su uso generalizado sea económico, debe ser impreso al mismo tiempo que el resto de la etiqueta y por consiguiente en una imprenta convencional. El factor más crítico para que la lectura de las etiquetas sea correcta lo constituye la distribución de la tinta durante la impresión, cuyo control es mucho más fácil en sentido perpendicular al de la dirección en que se desplace el papel, de ahí que se eligiese un sistema de codificación a base de rayas alineadas de modo que queden paralelas al eje de la rotativa.

La naturaleza del haz de luz láser de reducido tamaño y finamente focalizado hace que sea particularmente idóneo para leer esos signos codificados en forma de barras. Se han elegido modelos de helio-neón que emiten haces rojos para dicha tarea, debido en gran parte a que se puede confiar plenamente en ellos y a que son los más baratos entre los que producen luz visible (cualidad importante, ya que la impresión debe ser controlada visualmente).

El aparato lector láser cuenta también con medios para explorar con el haz de luz un dibujo geométrico determinado (diferentes fabricantes utilizan diversos medios y dibujos variados) a gran velocidad. La imagen es estudiada por el detector óptico del aparato. Cuando detecta unos signos que corresponden a algún código determinado, los transmite a la

computadora, la cual busca el precio y lo suma a la cuenta del cliente. El precio aparece también en una caja registradora automática situada a la salida, junto al nombre del artículo al que haga referencia (como por ejemplo, SOPA TOMATE CAMP 0,25). Además, el aparato deja oír un zumbido para indicar que ha leído el símbolo.

Tanto el propio láser, como los instrumentos ópticos que dirigen el haz de luz y los aparatos electrónicos auxiliares están instalados bajo el mostrador. El haz aparece a través de un cristal, un plástico o una simple rendija. Un empleado pasa todos los artículos que lleven el símbolo CUP por encima del mostrador, con los distintivos hacia abajo, para que el aparato los lea; en caso de que no emita el zumbido correspondiente, el empleado repite la operación, y si algún producto no lleva ninguna etiqueta CUP (por ejemplo, un manojo de plátanos) se ve obligado a pulsar los botones. Se puede ver la pauta que dibuja el láser colocando un trozo de papel u otro objeto junto a la ventanilla de lectura. La potencia del haz es lo suficientemente baja y la velocidad de su desplazamiento lo bastante alta para que no perjudique la vista.

Existe incluso un modelo de aparato lector que habla. La firma que lo ha creado es la Semiconductor Corporation, de Santa Clara, California. Ese aparato está dotado de circuitos de sintetización verbal que comunican al cliente las cantidades que se suman en la cuenta. Incluso en algunos casos pueden ser programados para que digan: «Gracias por haber comprado hoy en nuestro establecimiento.» Del aparato parlanchín los fabricantes han afirmado que «convertirá nuevamente el mostrador en el lugar amistoso que fue». No estamos muy seguros de eso.

La tecnología necesaria para los controles automáticos de salida existía ya en el año 1975, pero, hasta 1980, fueron escasos los supermercados que instalaron equipos de lectura. El retraso se ha debido, en parte, a la comprensible reticencia de los comerciantes ante una nueva tecnología; pero sobre todo, al poco tino de la industria norteamericana de los supermercados en su trato con los clientes.

Los aparatos lectores hicieron su aparición poco después de que los precios de los artículos alimenticios hubiesen aumentado enormemente y daba la impresión de que los supermercados los incrementaban de día en día. En aquellos momentos la ventaja más evidente de la nueva tecnología consistía en no tener que cambiar las etiquetas de precios de los artículos y, aunque las tiendas marcaban el precio en las estanterías, pare-

cía que a la mayoría de los clientes el sistema les inspiraba poca confianza, debido en parte a que las etiquetas preparadas para las computadoras les resultaban incomprensibles, y porque en los almacenes no suelen preocuparse excesivamente de que los artículos estén donde les corresponde. En muchos establecimientos, al detectar cierta hostilidad por parte de los clientes ante la ausencia de etiquetas con los precios, abandonaron rápidamente la idea. Hoy, en algunas zonas de Estados Unidos se exige que los precios estén marcados de modo comprensible al ojo del hombre. Sólo ciertos mayoristas y almacenes de rebajas han dejado de marcar los precios en sus artículos.

Los lectores automáticos han resultado ser sumamente útiles incluso en los establecimientos donde marcan el precio en todos los artículos, pero los supermercados tardaron cierto tiempo en comprenderlo. En la actualidad hay decenas de millares de lectores automáticos en miles de supermercados dispersados por Estados Unidos y algunos en Canadá. Japón y Europa occidental han creado también sus propios códigos CUP.

La lectura de códigos similares al CUP por medio de láseres ha encontrado numerosas aplicaciones, como la de contribuir a controlar las existencias de los bancos de sangre. Aparte de los supermercados, se suelen ver símbolos semejantes a los de CUP en la cubierta de libros y revistas de gran circulación. Suelen encontrarse en la parte inferior de la tapa, a la izquierda, y sirven para que el distribuidor controle fácilmente por medio del láser las devoluciones (a los editores sólo se les devuelven las cubiertas de los ejemplares no vendidos; parece ser que se destruye el resto de la publicación).

Lo que ha aportado grandes ventajas a los distribuidores se ha convertido en un engorro para los diseñadores gráficos, cuyo objeto es crear portadas atractivas. Con su estilo característico, la revista *Mad* presentó en la portada de uno de sus ejemplares a un personajete que atacaba las líneas codificadas con una máquina de cortar césped. Las briznas cortadas eran expulsadas por el tubo de escape.

Omni, la revista científica que ha recibido numerosos premios por la calidad de sus trabajos de arte y diseño, se negó durante dos años a imprimir en su portada los símbolos del CUP. La razón, según uno de sus diseñadores, era que les parecían simplemente feos, repugnantes. Pero incluso *Omni* se vio obligada a ceder y, en 1980, las familiares y «repugnantes» líneas aparecieron en la portada de su fastuosa revista. Según

Robert Castardi, del departamento de distribución de dicha publicación, no fueron los mayoristas quienes asestaron el golpe decisivo sino las cadenas de supermercados que se negaron a poner la revista a la venta. Los establecimientos de la cadena Safeway, entre otros, insistieron en que sus empleados pudiesen controlar la revista *Omni* por medio del lector láser automático al igual que los demás productos. Retrospectivamente, parece paradójico que una revista dedicada a la ciencia y tecnología futurista se opusiese con tanta vehemencia a la utilización de los láseres en las tiendas.

Probablemente el uso menos usual del lector de líneas codificadas láser consista en controlar los billetes de las estaciones de esquí. El primero de dichos sistemas entró en servicio durante el invierno de 1979-80 en la estación de Py Saint Vincent, en los Alpes franceses, donde un lector láser situado en la barrera de torniquete controla automáticamente unas tarjetas de plástico de 13×8 cm. Cada esquiador tiene sus propias cifras codificadas, y en ellas se indica la cantidad de veces que está autorizado a utilizar el teleférico. El sistema en cuestión fue elaborado por Option S.A., de Meylan, Francia, y su objeto es el de que, con un personal reducido, se pueda acelerar el paso de los esquiadores por las barreras, así como impedírselo a quienes no estén autorizados a cruzarlas.

LA LECTURA DE MANUSCRITOS

Los láseres son también capaces de leer letras y números, además de símbolos de diseño especial. El sistema sigue siendo el mismo: un haz de luz láser focalizado sobre un pequeñísimo punto explora lo que deba ser leído y analiza la luz reflejada. El objetivo último es que el láser pueda leer la misma escritura manual que utilizamos para comunicarnos habitualmente, pero se tardará todavía bastante tiempo en conseguirlo. El láser sólo es capaz de leer lo que haya sido impreso con determinados tipos de escritura.

Los resultados obtenidos hasta el momento son modestos. Uno de nosotros trabajó durante algún tiempo con un equipo de láser capaz de leer los caracteres con la bola especial de una máquina de escribir IBM Selectric (que utilizaba además una cinta también especial). El sistema era bastante común en las imprentas, pero desesperante. Los manuscritos

debían ser pasados a máquina en un formato que no dejaba espacio para su corrección y puesto que la mayoría de los escritores son incapaces de escribir con pulcritud, era necesario que una mecanógrafa copiase el texto. Cualquier marca que no hubiese sido realizada con un rotulador rojo o rosado (ambos invisibles para el haz rojo de láser) podía hacer que el texto fuera ilegible para el sistema. La lectura dejaba además bastante que desear. Los errores se repetían con tanta frecuencia que era esencial corregir el manuscrito antes y después de realizar las pruebas de imprenta. Además, en algunas ocasiones el equipo se confundía debido a algún defecto de la cinta o cualquier otro factor inapreciable visualmente y producía un texto repleto de equivocaciones. El progreso en la tecnología de la impresión sigue un ritmo tan acelerado que dicho sistema introducido a mediados de los años 70 ha quedado ya totalmente anticuado.

LA PREPARACIÓN DE PLANCHAS DE IMPRESIÓN

En la nueva generación tecnológica de la imprenta figuran los láseres capaces no sólo de leer el texto impreso sino de preparar panchas de impresión, como los que ya se utilizan en ciertos periódicos que se imprimen a gran distancia de su redacción. La misma tecnología permitirá la transferencia de la información almacenada en una computadora directamente a las planchas de impresión, sin ninguna etapa intermedia. Para comprender mejor la importancia de esos avances, echemos en primer lugar una ojeada al funcionamiento actual de los periódicos.

La mayoría de los periódicos de Estados Unidos han dejado de utilizar las tradicionales linotipias (artefactos mecánicos que funden el plomo para formar los caracteres de impresión) para usar en su lugar placas fotográficas. Dichas placas «frías» (que esencialmente no son sino fotografías) se pegan más adelante sobre un tablero con la configuración deseada para la impresión, se fotografía el conjunto y se obtiene un negativo con el que se graba finalmente la plancha de impresión que se colocará en una rotativa para imprimir el periódico, la revista o el libro.

Sin embargo, este procedimiento está quedando anticuado con la llegada de la composición computarizada, de uso particularmente generalizado en los periódicos, donde el tiempo y la rapidez son de suma importancia. Con dicho sistema, tanto los escritores como los redactores traba-

jan con terminales de computadora, donde escriben directamente el material que queda archivado en la memoria del ordenador. Cuando el artículo se da por terminado queda automáticamente listo para la imprenta sin otra etapa intermedia ni corrección.

Los primeros sistemas prácticos para la elaboración de planchas de impresión utilizaban, en realidad, dos láseres. El primero, de baja potencia, era de helio-neón y se utilizaba para leer los gráficos que se hubiesen colocado sobre un tablero y transmitirlos a la memoria de la computadora, la cual modulaba la intensidad del segundo láser de alta potencia (de argón o YAG y neodimio) al tiempo que el haz de luz se desplazaba por la superficie de una plancha de impresión especial. De este modo el segundo instrumento reproducía fotográficamente lo que leía el primero.

Numerosos periódicos en diversos lugares del mundo utilizan sistemas similares, que ofrecen una gran ventaja en particular a los que se imprimen en dos o más lugares distintos tales como el *New York Times o* el *Los Angeles Times.* La información recogida del original en la oficina de redacción puede ser transmitida simultáneamente a varios sistemas de escritura láser en lugares remotos. Estos sistemas son más comunes en Europa (donde muchos periódicos se distribuyen por todo el país) que en Estados Unidos.

La facilidad para producir planchas de impresión en lugares remotos no constituye la única ventaja de los láseres de fotograbación. Uno de sus primeros adeptos, el *Las Vegas Review-Journal,* afirmaba que los 200.000 dólares que les había costado el equipo al adquirirlo en 1976 en la Eocom Corporation de Tustin, California, les había permitido ahorrar un promedio de 100.000 dólares anuales entre mano de obra y material. Otra ventaja consiste en el hecho de que sólo se tarden cuatro minutos en elaborar una placa de impresión, comparada con la media hora que dura habitualmente la operación utilizando los métodos convencionales. Según Louis Harga, director de produción de la revista *Las Vegas...*, el sistema láser produce planchas de la misma calidad que el método anterior, es más tolerante con la suciedad y no causa las desagradables líneas que a veces se observan en las páginas impresas y que son producidas por los rebordes de algunos materiales.

La próxima etapa será grabar directamente las planchas, sin preparar previamente los originales sobre el tablero. El sistema ha sido presentado por Eocom, aunque su uso no se ha generalizado todavía. Por este proce-

dimiento la información necesaria para confeccionar la plancha la computadora la transmite directamente al láser grabador. El instrumento lector recibe imágenes fotográficas, dibujos y anuncios ya confeccionados y los convierte en información adecuada a la computadora. El redactor ordena el material desde su propia terminal y finalmente la computadora confecciona las planchas por medio del láser grabador.

El sistema de láser y computadora puede suprimir varias etapas intermedias y, por consiguiente, ahorrar dinero. No obstante los perjudicados serían los empleados de los periódicos, y de ahí la oposición de los sindicatos. En realidad, ésta fue la causa de la huelga de 88 días que tuvo lugar en 1978 en el *New York Times*, cuando el periódico quiso inaugurar sus nuevas instalaciones, entre las que figuraban varios láseres de grabación suministrados por LogEscan Systems de Springfield, Virginia. El *Times* ganó finalmente la batalla.

TRANSMISIÓN DE FACSÍMILES

La elaboración de planchas de impresión a partir de un original montado sobre un tablero, no es más que un caso especial dentro del problema general de la transmisión de facsímiles, es decir, la reproducción de un documento. Se trata de una tecnología que no ha llegado jamás a realizar grandes vuelos, pero que cumple numerosas funciones especializadas tales como la transmisión de fotografías y mapas meteorológicos, en algunos casos con la ayuda de láseres.

Las fotografías que la Associated Press facilita a los periódicos son reproducidas por los aparatos «Laserphoto» de la Harris Corporation. Estos se sirven de láseres de helio-neón que reproducen las imágenes sobre un papel fotográfico especial, cuyo revelado se efectúa, no con líquidos, sino por medio del calor. El procedimiento en cuestión se denomina «plata seca» (debido a que, al igual que el papel fotográfico convencional, utiliza plata, pero sin líquidos alguno) y es de gran utilidad para la reproducción de fotografías de alta calidad, aunque no para la transmisión general de facsímiles debido al elevado coste del papel.

Otro sistema es el diseñado por Xerox, en el que se combinan la técnica láser y la tecnología de las fotocopiadoras. Las fotocopiadoras Xerox, al igual que la mayoría, forman una imagen de lo que se desee re-

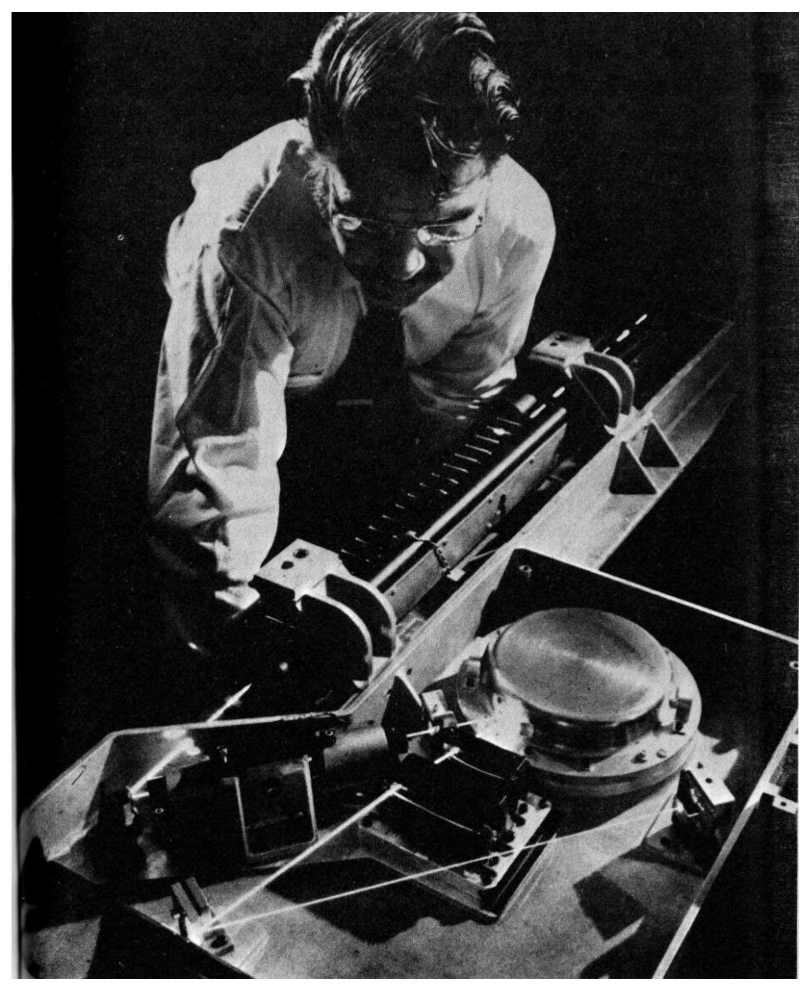
producir sobre un cilindro cubierto por una sustancia sensible a la luz, que a continuación transfiere, a una hoja de papel. El sistema de facsímiles láser de la Xerox (denominado Telecopier 200) graba directamente las imágenes recibidas sobre un cilindro con un láser de helio-neón y a continuación las transfiere al papel. Para transmitir una imagen, el mismo láser se utiliza para explorar el documento original y las medidas de la luz reflejada son convertidas a la forma adecuada para su transmisión a otro receptor. Una de las ventajas principales del uso de los láseres es la velocidad; se tardan escasamente dos minutos en transmitir una imagen, lo que representa la mitad del tiempo que invierten otros modelos, también de la Xerox, desprovistos de láser.

LA OFICINA DEL FUTURO

Puede que una tecnología láser similar a la descrita juegue un importante papel en las futuras oficinas. Para forjarnos una idea echemos una ojeada al concepto al que hace referencia la frase utilizada con abuso: «la oficina del futuro».

La mayor parte de la información que se procesa en oficinas modernas es de carácter lingüístico y en su mayoría susceptible de ser computariza- da. Han hecho ya acto de presencia ciertas computadoras especializadas denominadas procesadores lingüísticos, diseñados para operar con palabras en lugar de cifras. La próxima etapa consistirá en disponer de procesadores que se comuniquen entre sí sin necesidad de intervención humana. En realidad existen ya algunos sistemas de esta índole en el mercado, y entre ellos algunos modelos cuyo precio oscila entre los 50.000 y los 100.000 dólares, fabricados por los «gigantes del ramo» que son Xerox e IBM.

Las terminales de impresión de una y otra empresa son asombrosamente similares, ambas utilizan láseres para escribir y cilindros semejantes a los de las fotocopiadoras. El terminal cumple la función de receptor-transmisor de facsímiles, aunque en algunos modelos se limita a fotocopiar. Sin embargo su virtud primordial consiste en su amplia capacidad de impresión, gracias a la cual reproduce enteramente formularios, firmas y logotipos, además de cifras y palabras.



Un equipo de impresión de alta velocidad IBM, cuya tapa ha sido retirada para mostrar el láser de helio-neón en su interior. El láser de baja potencia graba los símbolos sobre un cilindro rotativo, y un polvo seco (sustituto de la tinta) que se adhiere a ellos los imprime seguidamente sobre el papel. International Business Machines Corporation

La tecnología de grabación es similar a la de las planchas de impresión, pero sin llegar a obtener el mismo grado de definición en la imagen, debido a que la tecnología de las fotocopiadoras no es tan precisa como la de la impresión (lo que es sobradamente evidente si se examinan sucesivos documentos fotocopiados).

Mientras que un impresor de facsímiles láser es capaz de producir una página en dos minutos, el sistema de impresión electrónico 57000 de la Xerox (procesador lingüístico de comunicaciones con numerosos atributos adicionales) puede recibir o transmitir una página en tres segundos, y cuando funciona como impresor puede llegar a producir 43 páginas por minuto. Y, con ciertos modelos especialmente diseñados, con sistemas de impresión láser pueden llegar a producirse hasta 300 páginas por minuto.

Hasta estos momentos han sido precisamente los aparatos más rápidos los que mayor éxito han tenido en el mercado, debido no sólo a su velocidad sino a su versatilidad. Las computadoras son capaces de generar una enorme cantidad de información y hace algunos años los grandes modelos se servían con frecuencia de varias máquinas de imprimir simultáneamente. Las impresoras láser de alta velocidad son capaces de producir formularios o cualquier otro tipo de documento con una rapidez muy superior a la de los impresores de «impacto» (que deben su nombre al hecho de que, al igual que en las máquinas de escribir, ciertos punzones u otros mecanismos golpean físicamente la cinta). Además, la impresión producida por láser es perfectamente regular y el estilo de su letra más variado y atractivo que el de los aparatos de impacto. El resultado es parecido al de una buena fotocopia del original y aunque se examine con una lupa es imposible detectar la intervención del láser.

El coste de dichos sistemas, del orden de los 200.000 dólares, es sumamente elevado. Sin embargo su velocidad y versatilidad pueden ser de incalculable utilidad para ciertas organizaciones que produzcan gran cantidad de material computarizado, ya sea para remitir a sus clientes, (información financiera o publicidad postal, por ejemplo) o para informes internos.

LAS FOTOGRAFÍAS DE LOS SATÉLITES

Los láseres también han sido utilizados para grabar imágenes con una elevada resolución. La NASA se sirve de ellos para grabar las imágenes que recibe del espacio. Por ejemplo las ampliamente divulgadas fotografías del LANDSAT fueron compuestas con las señales transmitidas desde un satélite. En tierra la NASA dispone de un sistema láser construido por la RCA, cuyo objeto es el de grabar las fotografías en una película para ser analizadas por los técnicos. La resolución de dicho sistema es excepcional; puede grabar 20.000 puntos independientes en una sola línea de una película de 24,1 cm de anchura. Cuenta además con otro sistema similar construido también por la RCA para grabar la información procedente de su satélite síncrono-meteorológico.

MEMORIAS ÓPTICAS

En el capítulo 13 hablamos del uso de los láseres para la reproducción de programas pregrabados en videodiscos. Sea cual sea el concepto que tengamos de los programas de televisión, la realidad es que cada uno de ellos contiene una enorme cantidad de información. Ciertos promotores de videodiscos decidieron servirse de la tecnología láser para grabar y reproducir dicha información. Técnicas similares a las usadas por N.V. Philips y MCA Inc., en sus aparatos de video domésticos permiten también la grabación de información digital computarizada cuya capacidad ha sido demostrada en la práctica por empresas como la Philips, RCA y otras, a través de prototipos que si bien en estos momentos no se encuentran todavía en el mercado, no cabe duda de que aparecerán en un futuro no demasiado lejano. Sus promotores hablan de la posibilidad de grabar un mínimo de 10 mil millones de bits en una sola cara de un disco óptico. ¿Cómo es posible que lo logren?

El truco consiste una vez más en poder focalizar el haz de luz láser sobre un pequeñísimo punto, lo que le permite grabar información en forma de agujeros de un micrómetro (la millonésima parte de un metro) de diámetro producidos por la quemadura de un material sensible a la luz, que consiste generalmente en una fina película que cubre el disco que gira a gran velocidad. Para grabar información se utilizan pulsacio-

nes extremadamente cortas, de forma que los puntos no se extiendan excesivamente cuando gire el disco.

Para leer la información grabada por dicho procedimiento se utiliza también un láser, pero en este caso de baja potencia con el fin de evitar cualquier quemadura accidental. El lector se focaliza también sobre un punto muy reducido mientras gira el disco y la luz reflejada por el mismo es analizada para extraer la información que contenga.

Lo que no se puede lograr con los sistemas ópticos actuales es la modificación o sustitución de los datos grabados, como lo permiten los equipos de grabación magnéticos. Por consiguiente, no es posible poner al día la información grabada sin producir un nuevo disco, aunque se pueden introducir pequeños cambios en espacios dejados deliberadamente en blanco.

Y, aunque en algunos casos lo que importa es poder modificar constantemente la información registrada, existen también situaciones en las que la posibilidad de alterar el material registrado no supondría ventaja alguna; siendo el coste de la información archivada por procedimientos ópticos muy inferior al de los magnéticos, y además de mayor duración. Otra ventaja del sistema óptico la constituye la velocidad con la que se puede acceder a la información deseada y que es también muy superior a la de los sistemas magnéticos.

Probablemente las primeras aplicaciones de los discos ópticos las constituirán los casos en que los sistemas tradicionales de grabación resulten excesivamente caros. Un ejemplo lo tenemos en una pequeña compañía de seguros de Los Angeles, llamada Ticor, donde pretenden archivar digitalmente una enorme cantidad de títulos de propiedad en una memoria óptica (en este caso han optado por diapositivas en lugar de discos, pero la idea es la misma). Cualquier información que deseen podrá ser obtenida en 12 segundos, una velocidad evidentemente muy superior a la que permitiría la manipulación de fichas convencionales.

Puede que la tecnología de la memoria óptica encuentre otras aplicaciones aparte de los mencionados discos. Jerry Drexler, presidente de la Drexler Technology Corporation de Mountain View, California, ha propuesto el uso de una línea de memoria óptica en el reverso de las tarjetas de crédito para sustituir la banda magnética utilizada en la actualidad. La amplia capacidad del material óptico permitiría que hubiese espacio más que suficiente para registrar el crédito del titular y grabar cualquier otra

información necesaria. La propuesta se estudia en estos momentos, junto a otra sugerencia: la incorporación de una microcomputadora en cada tarjeta, aunque eso, según Drexler, resultaría muy caro en la práctica. También ha propuesto el uso de tarjetas con memoria óptica en las que se guardaría el historial médico del titular.

LA COMPUTACIÓN ÓPTICA

Hasta ahora hemos hablado de técnicas relacionadas con la habilidad del láser para leer y escribir que se aplican ya, o lo harán en un futuro inmediato, en la práctica. Sin embargo la equivalencia aritmética del láser —denominada generalmente computación óptica por razones que aclararemos más adelante— ha encontrado escasas aplicaciones más allá del laboratorio. El tema es complejo y no pretendemos tratarlo con la profundidad que se merece, pero ofrece fascinantes posibilidades.

Existe la posibilidad de construir el equivalente óptico a las funciones lógicas digitales que se encuentran en el interior de las computadoras, pero no es tarea fácil. Algunos investigadores intentan perfeccionar la «óptica integrada» que consistiría en la elaboración de una serie de elementos ópticos en una delgada película sobre una pieza de algún otro material. Puede que algún día dichos circuitos ópticos desempeñen algunas de las funciones que actualmente corresponden a los circuitos integrados eléctricos, aunque hoy por hoy su mayor atractivo consiste en la facilidad con que pueden realizar ciertas operaciones de relativa dificultad para las computadoras electrónicas convencionales.

La idea se basa en el hecho de que existe una lente que puede realizar una función matemática, denominada *transformada de Fourier*, de la luz (procedente quizá de un láser) que la atraviese. No se trata de simple aritmética, sino de cálculos diferenciales e integrales, y tienen su utilidad. Supongamos por ejemplo que dispusiésemos de una fotografía tomada desde un satélite, con unas líneas paralelas sobre su superficie que deseásemos eliminar. Al someter dicha imagen a una transformada de Fourier se separaría la luz de dichas líneas de la del resto de la imagen, lo que nos permitiría bloquear la luz correspondiente a las líneas antes de realizar una nueva transformada de Fourier con una lente idéntica a la anterior para reconstruir la imagen original desprovista de las engorrosas líneas.

Otra versión algo más compleja del mismo sistema nos permitiría el reconocimiento automático de imágenes. Imaginémonos por ejemplo a un general con un montón de fotografías aéreas en las que espere descubrir un tanque enemigo sin perder una semana examinándolas una a una con todo detalle. Una versión altamente simplificada de lo que podría hacer consistiría en sobreimponer un transformada de Fourier de un tanque sobre la transformada de Fourier de cada fotografía y someter el conjunto a una nueva transformada de Fourier. De este modo se habrían eliminado todos los elementos de la fotografía original a excepción del tanque, que aparecería en la fotografía filtrada si realmente se encontraba presente.

Los militares cuentan también con otros usos potenciales para dicha técnica. Les gustaría elaborar armas capaces de reconocer automáticamente al enemigo, seguirlo y destruirlo. La operación es evidentemente delicada puesto que hay que realizar ciertas críticas y sutiles distinciones a fin de no confundir los tanques enemigos con los propios.

Todavía queda mucho camino por recorrer antes de que las técnicas de filtrado y mejora de imágenes pueden utilizarse en la práctica. Sin embargo se usan procedimientos ópticos para mejorar la calidad de las imágenes de un tipo especial de radar denominado de *apertura sintética*, cuyo objetivo es el de conseguir una alta resolución a pesar del reducido tamaño de sus antenas. Se han descubierto otras aplicaciones para las técnicas de computación, pero por ahora la mayoría no han salido todavía de los laboratorios.

En realidad la luz utilizada para la computación óptica no tiene que ser necesariamente láser, y aunque en muchos casos su coherencia y monocromaticidad suponen una gran ventaja, en otros puede introducir un ruido indeseado. Todavía es imposible saber con certeza cuál será el papel del láser en dicha tecnología a largo plazo, puesto que se encuentra en su primera etapa de desarrollo.

12. LA HOLOGRAFIA: UNA ESPECIE DE MAGIA

Hay algo mágico en la holografía que uno no alcanza a comprender hasta que se enfrenta cara a cara con un holograma. Cuando la luz es correcta, produce una inconfundible imagen tridimensional suspendida en el vacío. No obstante se diferencia de los objetos reales: sus colores no son naturales, está dotada de una sutil granulación y tiende a esfumarse o desaparecer al observar el holograma desde ciertos ángulos. A pesar de todo con frecuencia la gente intenta tocar sus imágenes y encuentra sólo aire.

Cuando visiten la ciudad de Nueva York, les sugerimos que no dejen de ver el museo de la holografía situado en el número 11 de Mercer Street, Manhattan, en el pintoresco distrito de Soho. Se trata de un lugar diminuto comparado con la mayoría de los museos, con tecnología ultramoderna instalada en un edificio de 110 años situado en una decrépita callejuela. En su interior, un grupo de entusiastas de la holografía hablan gustosos de otra gente y otros lugares donde se comparte su interés. El círculo de iniciados, aunque reducido, existe ya.

Después de pasar algún tiempo en el museo se apreciarán tanto las virtudes como los defectos de la holografía. Algunos de los hologramas son rudimentarios desde el punto de vista técnico y otros lo son desde el artístico. Y no es difícil forjarse una idea de cuánto tardarán todavía los hológrafos en alcanzar el sueño preconizado por la ciencia-ficción, que es el de llenar el ambiente con imágenes tridimensionales. Sin embargo, también se da uno cuenta del progreso técnico y artístico que realizan los artistas para extraerle el mayor provecho posible al nuevo medio.

Junto a las promesas se encuentran los problemas. Las posibilidades de la holografía se han exagerado sobremanera y numerosos especialistas han sido desacreditados. Predomina cierto cinismo, no totalmente injustificado que un decepcionado ingeniero resumió en la siguiente frase: «Los únicos que ganan dinero con la holografía son los pornógrafos.» (Más adelante hablaremos del tema con mayor detalle.)

En este capítulo realizaremos un viaje a través del fascinante mundo de la holografía. Nos detendremos para disipar algunas falsas expectativas y señalar ciertas maravillas prácticamente desconocidas. Comenta-

remos algunas aplicaciones ignoradas por la mayoría, puesto que la holografía —además de ser una forma de arte única y exclusiva que se utiliza incluso en ciertos juegos de video— cumple algunas funciones industriales, como la verificación de neumáticos de aeroplano, y se usa también para la restauración de antiguas pinturas y esculturas.

Sin embargo, es preciso que en primer lugar expliquemos lo que es la holografía y para ello nos vemos obligados a retroceder, con el fin de examinar de nuevo brevemente la física de la luz.

EL CONCEPTO DE LA HOLOGRAFÍA

La holografía no es una mera técnica para producir imágenes tridimensionales con un láser, sino todo un concepto.

Para comprenderlo debemos imaginar la luz en forma de ondas electromagnéticas y recordar que una de sus importantes propiedades es la frecuencia. Debemos también tener en cuenta otras dos características que hemos mencionado brevemente: la amplitud (distancia que media entre la cresta y el fondo de la onda) y la fase (el lugar donde se encuentre en su ciclo de oscilación).

Todo cuanto vemos es, en realidad, la luz reflejada por los objetos que nos rodean. Desde el punto de vista físico, dichos objetos crean un *frente de onda*, de luz reflejada, que *contiene toda la información que llega hasta nuestros ojos* y que nos permite ver cuándo es descifrada por el cerebro. Supongamos que lográsemos grabar con toda precisión un frente de onda en un plano situado ante nosotros (una gran «rebanada» de la luz que tengamos delante de los ojos) de manera que pudiésemos reconstruir posteriormente dicho frente de onda con toda exactitud. La imagen reconstruida sería tan tridimensional como la original. Esto fundamentalmente es lo que se propone la holografía.

Puede que alguien se pregunte, ¿no es eso lo que hacen las cámaras fotográficas? ¿No consiste precisamente la fotografía en grabar un frente de ondas, un plano de radiación electromagnética, sobre una película plana? En una palabra, no. Como hemos mencionado anteriormente hay dos factores esenciales que intervienen en la reconstrucción de frentes de ondas: la amplitud y la fase. Tanto las películas fotográficas como los detectores electrónicos perciben únicamente la intensidad, que depende

de la amplitud, pero son insensibles ante la fase y por consiguiente sus imágenes son exclusivamente bidimensionales.

En realidad, también nuestros ojos son sólo capaces de percibir la amplitud, pero uno y el otro ven desde ángulos ligeramente distintos, lo que permite que el cerebro compare las sutiles diferencias de las imágenes bi- dimensionales procedentes de cada uno de ellos y genere la visión tridimensional que tenemos del mundo. Las pequeñas diferencias de visión desde uno y otro ángulo se deben en parte a la invisible información de la fase contenida en el frente de onda y, en efecto, el cerebro reconstruye automáticamente dicha información sintetizando con ello la imagen tridimensional.

El mismo principio se usa en trucos fotográficos para crear imágenes de tres dimensiones. Con dos cámaras se toman fotografías desde dos ángulos ligeramente diferentes para mostrarlas después independientemente a cada uno de los ojos. Entonces se perciben dos imágenes bidimensionales que el cerebro reconstruye automáticamente formando la imagen tridimensional auténtica.

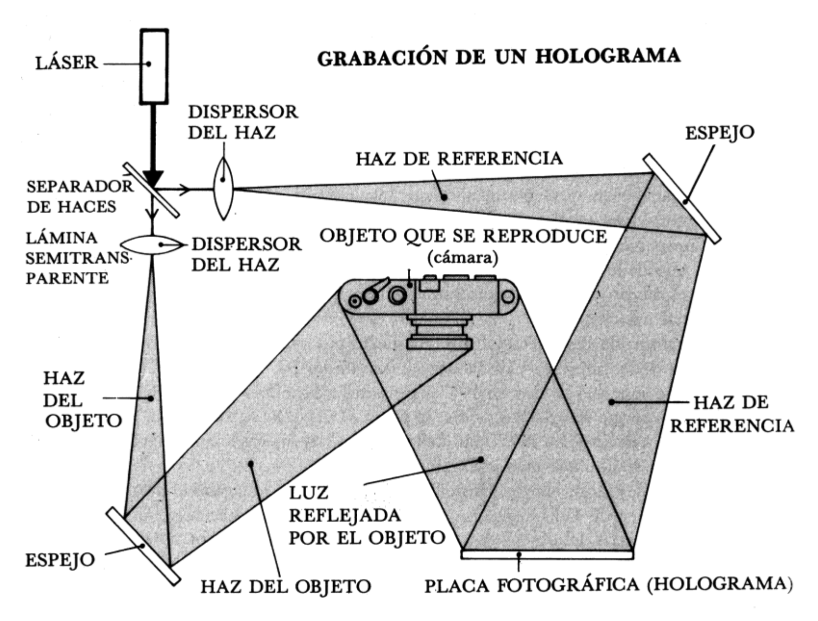
La holografía es la técnica que nos permite registrar información simultánea de la amplitud y de la fase de una onda. Su inventor fue Denis Gabor que concibió la idea en 1947 y presentó un modelo práctico de ella en 1948. Aunque realizó sus primeras pruebas con luz, su verdadera ambición era la de mejorar la calidad de la imagen del microscopio electrónico (del que se hablará más adelante).

La idea de Gabor era muy sencilla, y por ella le fue otorgado el premio Nobel de física de 1971. Bastaba con superponer dos frentes de onda de luz, uno procedía del objeto que estaba siendo iluminado y el otro correspondía a un haz de referencia que no entraba en contacto con el mencionado objeto. Gabor registró sobre una placa fotográfica la distribución de intensidades que se originaba en el lugar donde se superponían ambos frentes de onda. El diagrama número 12 muestra el montaje característico para impresionar un holograma.

Puesto que el haz de referencia podía ser controlado con toda precisión y recreado cuando se desease, podría proyectarse a través de la placa fotográfica obtenida para reconstruir el frente de ondas producido por el objeto en cuestión.

Lo que se grabe sobre la placa fotográfica depende de la manera en que dos grupos de ondas luminosas, uno procedente del propio objeto y

otro del haz de referencia, se sumen según un fenómeno denominado interferencia.



12. Para grabar un holograma se divide el haz del láser en dos: el haz del objeto y el de referencia. Ambos haces deben recorrer aproximadamente la misma distancia hasta llegar a la placa fotográfica, pero el haz del objeto habrá sido reflejado por el objeto que se desee grabar. Al coincidir ambos haces sobre la placa forman una figura de interferencia que no se parece en absoluto a la imagen del objeto. Para reconstruir la imagen tridimensional del objeto es preciso que un haz láser idéntico al de referencia utilizado en la grabación atraviese la figura de interferencia grabada en la placa fotográfica. (En nuestro ejemplo nos hemos servido de una máquina de fotografiar simplemente porque se trata de un objeto fácilmente reconocible desde cualquier ángulo.) Existen también hologramas que pueden ser reconstruidos sin la ayuda de ningún láser.

Tal como aclaramos en el capítulo 9, esto significa que las amplitudes instantáneas de las respectivas ondas se suman al superponerse. En el caso de que la cresta de una corresponda con el fondo de la otra la suma de ambas equivale a oscuridad, pero cuando correspondan ambas a cres-

tas o fondos se obtendrá un punto luminoso. Esto ocurre debido a que lo que vemos es la intensidad, que equivale al cuadro de la amplitud, la cual, a su vez, corresponde a la distancia que medie entre la cresta y el fondo de vemos es la intensidad, que equivale al cuadro de la amplitud, la cual, a su vez, corresponde a la distancia que medie entre la cresta y el fondo de la onda resultante. Las oscilaciones debidas a la fase se suceden con excesiva rapidez para ser percibidas por el ojo humano o incluso por el más veloz de los detectores electrónicos.

El holograma en sí no es más que una imagen en blanco y negro que representa la figura de interferencia producida por la superposición de ambos frentes de onda. Dicha figura contiene la segunda propiedad fundamental y necesaria para producir imágenes tridimensionales, es decir, la fase. ¿De dónde procede la fase? Por supuesto no de la magia, sino del haz de referencia. No olvidemos que la figura del holograma habrá sido producida por la interferencia, que depende precisamente de la fase de ambas ondas. Si conocemos la figura de interferencia producida por la luz del objeto y la del haz de referencia, y si podemos recrear éste último con toda precisión, en teoría disponemos de todo lo necesario para reproducir el frente de onda del objeto.

A simple vista, los hologramas no se parecen al objeto que representan y con frecuencia se diría que son producto del azar. Sin embargo nos permiten reproducir el objeto en cuestión siempre que lo deseemos, a condición de que iluminemos la placa que contiene el holograma con el haz de luz de referencia correspondiente. La *difracción*, es decir la forma especial en que el haz de referencia se dispersa a través de la figura de interferencia (el holograma), es lo que reconstruye el frente de onda del objeto que viaja entonces hacia nuestros ojos como si jamás hubiese sido interrumpido por la placa fotográfica.

Cabe destacar que la imagen que se produce es la misma, tanto si la fotografía holográfica es positiva como negativa. «Ha resultado que, en la holografía, la naturaleza se encuentra en el bando de los inventores», declaró Gabor en el discurso que pronunció cuando recibió el premio Nobel.

La holografía exige otra condición de la que no hemos hablado todavía: la coherencia. Cuando hablamos de los fundamentos del láser dijimos que la coherencia consistía en que las ondas se desplazasen exactamente en fase. De la misma manera la holografía, sólo se verifica si la luz

del haz de referencia y la procedente del objeto se desplazan exactamente en fase. La luz coherente debe ser además monocromática, es decir de la misma longitud de onda.

En la práctica, esto significa que la luz de ambos haces debe proceder de la misma fuente y la distancia que recorren ambos haces no puede ser superior a la longitud de coherencia de la luz, es decir, la distancia a lo largo de la cual las ondas se mantengan perfectamente en fase. La longitud de coherencia de una bombilla común es esencialmente cero, mientras que la de los láseres suele ser como mínimo de varios metros.

Gabor trabajó en el campo de la holografía durante más de doce años antes del descubrimiento del láser, y la mejor fuente luminosa que encontró fue la de una lámpara de mercurio de alta presión cuya coherencia era tan sólo de 0,1 mm, es decir unas 200 ondas luminosas. Esto limitaba enormemente sus experimentos. Con el fin de asegurarse de que ambos haces de luz recorrían la misma distancia, se sirvió de un esquema óptico en el cual era el propio haz de referencia el que iluminaba el objeto, que consistía en una fotografía transparente de sólo un milímetro de diámetro. La anchura del holograma propiamente dicho era de 1 cm y tardaba varios minutos en grabarlo en la película más sensible de que se disponía. Con su técnica, el holograma estaba plagado de luz superflua que oscurecía la imagen reconstruida y el montaje óptico que utilizaba no separaba satisfactoriamente la imagen reconstruida de dicha luz. Superada la euforia inicial, decreció el interés y, a mediados de los años cincuenta, el tema parecía haber quedado sumido en un profundo aletargamiento.

LEITH Y UPATNIEKS

A pesar de la aparente calma reinante había quien se preocupaba todavía de la holografía. En el laboratorio de Willow Run, de la universidad de Michigan, en Ann Arbor (actualmente denominado Instituto de investigación ambiental de Michigan), Emmett N. Leith y varios colegas realizaban estudios teóricos sobre la holografía. Sin embargo, debido a que su investigación formaba parte de un sistema de radar, no publicaron nada en aquella época.

Leith trabajó silenciosamente desde 1955 hasta 1962 y asegura haber obtenido «éxitos considerablemente fenomenales» durante aquel período

con el uso de lámparas de mercurio. Su trabajo teórico comenzó a producir resultados sumamente positivos cuando aparecieron los láseres. Entre Leith y Juris Upatnieks perfeccionaron un montaje óptico en el cual la luz se dividía en dos haces: uno era el haz de referencia y el otro se utilizaba para iluminar el objeto y, posteriormente, se superponía con el haz de referencia para formar un holograma.

Durante sus primeros experimentos, ambos investigadores se sirvieron tanto de los láseres como de los arcos voltaicos de mercurio. «Cada uno de ellos ofrecía ciertas ventajas y no era fácil decidir cuál era el mejor», dijo Leith. «Finalmente nos decidimos por el láser, pero se podían conseguir hologramas de alta calidad con ambas fuentes luminosas, fue cosa de decidir qué grupo de ventajas aprovechar y qué problemas atacar.»

Si bien el mérito de la holografía (incluido el premio Nobel) le fue atribuido a Gabor, fueron Leith y Upatnieks quienes la convirtieron en una realidad práctica. Sus primeros experimentos tuvieron lugar con objetos planos, pero no tardaron en trabajar con objetos tridimensionales. Según Leith, «para ello no se requirió mucha más teoría, pero fue preciso experimentar con nuevas técnicas».

El comentario de Leith no podía ser más evidente. En los hologramas de objetos planos no se requería demasiada coherencia, pero sí era necesaria con los tridimensionales. Entonces el láser se convirtió en un aparato de absoluta necesidad, debido a que la longitud de coherencia precisa para los hologramas de objetos tridimensionales equivale aproximadamente al doble de la profundidad de dichos objetos.

También fue necesario amortiguar todas las posibles vibraciones, como las producidas por los camiones o la puesta en marcha de algún motor cercano, ya que se demostró que afectaban la reconstrucción de la imagen. Para ello fue preciso servirse de una descomunal mesa óptica aislada de todas las posibles vibraciones transmitidas por el suelo. Los pioneros de la holografía se sirvieron de planchas pesadas y tubos metálicos, pero en los laboratorios modernos se usan mesas cuya construcción puede llegar a costar miles de dólares.

OBTENCIÓN DEL HOLOGRAMA

Examinemos la elaboración de un holograma de un objeto tridimensional por el método de Leith y Upatnieks.

Se comienza con un solo láser que emite un único haz de luz, que a continuación se divide en dos haces independientes por medio de una lámina semitransparente que permite el paso de parte de la luz y refleja el resto. Con uno de los haces se ilumina el objeto de forma que sea finalmente recogido por una placa o película fotográfica, hacia donde también se dirige el otro si bien por una trayectoria diferente. La distancia recorrida por ambos haces debe ser aproximadamente la misma. Se expone la placa o película fotográfica a la superposición de ambos haces para producir la imagen de su interferencia. Una vez revelada, la placa o la película constituye el holograma.

En holografía se suele utilizar un tipo especial de película debido a que la resolución que se requiere es superior a la de la fotografía. Dichas películas son especialmente sensibles a la luz roja, puesto que para los hologramas se acostumbran a utilizar láseres de helio-neón cuya luz crearía un efecto despreciable en las películas comunes.

El holograma con su figura de interferencia no recuerda en absoluto al objeto del que ha sido obtenido. En palabras de Gabor, «parece la imagen de los ruidos parásitos».

Pero no lo es. Podemos reconstruir la imagen iluminando el holograma con una luz igual a la del láser utilizado para atravesar la placa holográfica y que al difractarse reproduce el frente de onda de la luz reflejada por el objeto en cuestión. Es como si dicho frente hubiese sido congelado en el holograma y el haz de luz le devolviese la vitalidad necesaria para proseguir en su camino hacia nuestros ojos. Puesto que lo que vemos es la luz reflejada por el objeto, tenemos la ilusión de encontrarnos realmente ante una imagen tridimensional.

Por supuesto, las posibilidades de la holografía son limitadas. En general, cuanto mayor sea el objeto más difícil será elaborar un holograma. Esto se debe a que la luz utilizada debe ser coherente a lo largo de una distancia que equivalga aproximadamente al doble de la profundidad de dicho objeto y además debido a ciertas consideraciones prácticas tales como disponer de películas o placas holográficas del tamaño necesario.

Realmente es muy difícil reproducir la imagen de un objeto de más de un metro de longitud, a pesar de que se ha logrado ya.

Otra característica de los hologramas es su aspecto granulado. Esta granulación recibe el nombre de moteado, y constituye una consecuencia inevitable de las variaciones irregulares de fase de la luz coherente causadas por interacciones con la atmósfera, superficies reflectoras y prácticamente todo lo demás con lo que se encuentre la luz. «No se trata de ruido, sino de información indeseada», aclaró Gabor con relación a la información referente a las minúsculas irregularidades de las superficies y a las fluctuaciones de la atmósfera. Los efectos de este moteado pueden ser utilizados constructivamente, sin embargo en general suelen crear problemas.

Hasta estos momentos hemos hablado exclusivamente de hologramas monocromáticos, es decir de un solo color que corresponde al del haz de luz utilizado para iluminarlos. La reproducción de los colores naturales sigue hurtándose a los hológrafos, aunque se han realizado ciertos progresos de los que hablaremos en seguida.

Los hologramas están dotados de ciertas raras propiedades que parecen desafiar el sentido común. En muchos casos, con sólo parte del holograma se logra reconstruir la totalidad de la imagen. Esto se debe a que graba el mismo frente de onda sobre la superficie entera y repite en cierto modo la misma figura muchas veces. Por consiguiente, iluminando sólo parte del holograma se reconstruye la totalidad del frente de onda, si bien en la práctica la calidad es inferior que si se usa la totalidad de la placa.

También es posible grabar varios hologramas en la misma placa utilizando diferentes haces de referencia o simplemente cambiando el ángulo del haz. Si se graban correctamente, sólo se verá una imagen reconstruida en un momento dado a pesar de que haya otras en la misma película.

HOLOGRAMAS DE LUZ BLANCA

Lo que hemos descrito hasta estos momentos son los hologramas relativamente simples ideados inicialmente por Leith y Upatnieks. El holograma se construye con un láser y la imagen se reproduce con otro láser. Pero existen también hologramas que no precisan ningún láser para reconstruir las imágenes, aunque sí para ser construidos.

Cuando, a principios de los años sesenta, Leith y Upatnieks perfeccionaban su técnica holográfica, en la Unión Soviética Yu N Denisyuk estudiaba el mismo tema desde otro ángulo. Hasta entonces se habían logrado reconstruir imágenes con una luz que *atravesase* el holograma. Denisyuk desarrolló una teoría referente a los hologramas *reflectores* en lugar de transmisores.

Según sus cálculos, debía ser posible reflejar la imagen del holograma e iluminarlo con luz blanca en lugar de láser, es decir, luz procedente de una bombilla común o de un tubo fluorescente. Si bien la luz común está formada por múltiples longitudes de onda, entre ellas se encuentra también la que corresponde exactamente a la del láser utilizado inicialmente y con ella se puede reconstruir una imagen de un holograma de reflexión, mientras que la luz de las demás longitudes de onda, en efecto, no es utilizada. La imagen, por consiguiente, es de un solo color, a pesar de que la luz utilizada no lo sea.

Denisyuk elaboró su teoría en 1962, pero no pudo demostrarla en la práctica porque carecía de láser. En realidad fueron los norteamericanos George W. Stroke y A. Labeyrie los primeros en producir hologramas de reflexión. Eso ocurría en 1965.

Los hologramas de reflexión permiten la reproducción de imagen a todo color. Para lograrlo es preciso servirse de un mínimo de tres láseres con una variedad suficiente de color para reproducir la totalidad de la gama visible del espectro. Cada uno de los haces de luz produciría un holograma independiente que se superpondría a los demás sobre la misma placa fotográfica. En teoría, por este procedimiento se debería poder reconstruir una imagen a todo color iluminando simultáneamente el holograma con los mismos colores utilizados para elaborarlo, pero en la práctica todavía queda mucho camino por recorrer. Y los hológrafos rusos son los que mayor progreso han realizado en este campo.

HOLOGRAMAS DE ARCO IRIS

Stephen A. Benton, hológrafo de la Polaroid, ha adquirido una fama considerable por su trabajo en otro tipo de hologramas de luz blanca. Al contrario de los de Denisyuk, los hologramas de Benton son de transmisión y la clave de su técnica ha consistido en *reducir* la cantidad de in-

formación contenida en los mismos. Cuando se reconstruye un holograma convencional se utiliza en realidad más información de la necesaria para la formación de una imagen tridimensional. Nuestra sensación de profundidad obedece al hecho de que miramos los objetos con ambos ojos, separados el uno del otro en el mismo plano horizontal. Sin embargo, los hologramas convencionales proporcionan suficiente información para que la imagen sea tridimensional desde cualquier ángulo de visión. Benton ha ingeniado un sistema óptico en el que se conserva la perspectiva horizontal pero se elimina la vertical. Sus imágenes holográficas pueden verse siempre y cuando se miren en el sentido correcto y sin ladear la cabeza; si se colocan en sentido horizontal desaparece la imagen. Lo más importante es que esta técnica permite reconstruir la imagen con luz de cualquier longitud de onda en la gama visible (véase el diagrama N.° 13).

Debido a que sólo precisan luz blanca, los hologramas elaborados con la técnica de Benton son luminosos y de fácil reconstrucción. La estructura de los mismos provoca también un efecto secundario interesante: un arco iris de colores dispuestos verticalmente sobre la imagen reconstruida. El color de la imagen varía al desplazar los ojos de arriba hacia abajo. La coloración carece de realismo, pero es sumamente atractiva.

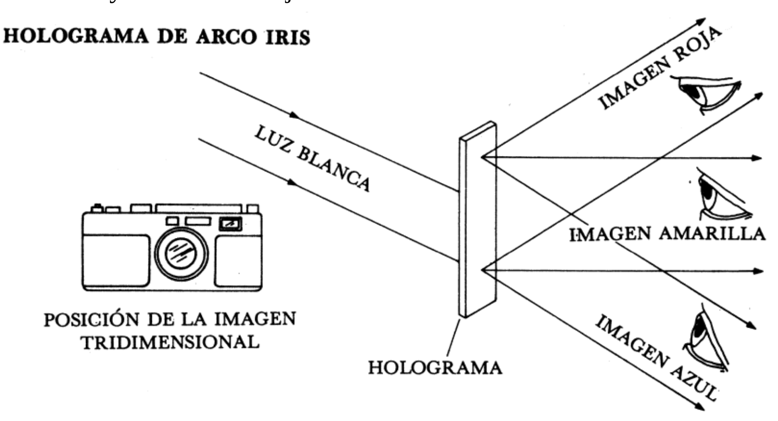
EL CINE HOLOGRÁFICO

El próximo paso, que será gigantesco, lo constituirá el cine holográfico. Como de costumbre, lo que se ve en las películas no corresponde con exactitud a lo que nos depara el futuro. «A pesar de las expectativas engendradas por ciertas películas populares, como *La guerra de las galaxias*, esas imágenes (móviles) tridimensionales no se proyectarán en el vacío, sino sobre una “pantalla” que constituye de por sí un complejo instrumento óptico», dijo Benton en 1980 en un artículo sobre imágenes holográficas.

El progreso realizado hasta estos momentos en el cine holográfico es mucho más modesto de lo que sugiere la escena de *La guerra de las galaxias* en la que el robot R2-D2 proyecta la imagen de la princesa Leia (que dicho sea de paso no era un auténtico holograma, sino un efecto especial cinematográfico). El método más divulgado, que se basa en un

truco perfeccionado por un holόgrafo de San Francisco llamado Lloyd Cross, permite grabar una cantidad limitada de movimientos que en la opinión de ciertos expertos no llegan fácilmente a ser percibidos como tales.

La técnica perfeccionada por Cross, denominada holografía *multiplex,* se basa en la del arco iris de Benton. De la misma manera que una película consiste básicamente en una serie de fotos fijas, un holograma multiplex se confecciona grabando una serie paralela de hologramas de arco iris en sentido vertical, de forma que cada uno de ellos corresponda a un cuadro de una película convencional. La capacidad máxima de los multiplex es algo superior a los mil hologramas impresionados sobre una película cuyos extremos se juntan formando un cilindro.



13. Los hologramas de arco iris son impresionados por medio de un láser, pero para reproducir las imágenes impresionadas se iluminan con una luz blanca común (como la de una vulgar bombilla). Dichos hologramas deben su nombre al hecho de que cambian de color según sea el ángulo desde el que se miren. Esto ocurre porque la figura de interferencia grabada en la película difracta la luz de diferentes colores con ángulos distintos, descomponiendo, de la misma manera que un prisma de dispersión, la luz blanca en los respectivos colores que componen su espectro.

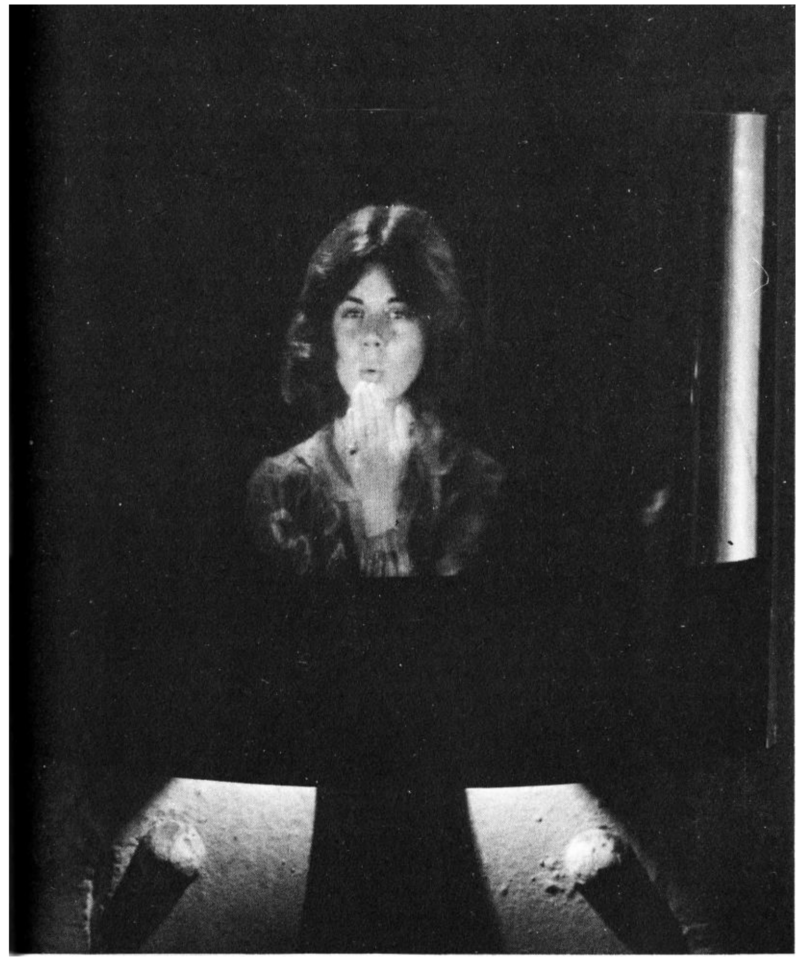
Dicho cilindro se ilumina entonces desde el interior con una bombilla corriente y la imagen tridimensional aparece en su interior. Al hacerlo girar, o si se camina a su alrededor, da la impresión de que la imagen se mueve.

Los hologramas multiplex han sido utilizados para producir las más espectaculares «minipelículas», aunque con ellos también pueden confeccionarse retratos tridimensionales con fotografías de una persona tomadas desde distintos ángulos, de modo que formen un círculo completo. Y el resultado sería la aparición de una sola imagen tridimensional en el interior del cilindro, que podría ser observada desde cualquier ángulo.

La confección de un holograma multiplex es sumamente laboriosa debido a los numerosos hologramas individuales que es preciso impresionar. Sin embargo, se pueden hacer copias del original con mucha facilidad, al igual que con los de arcos iris. Dicha facilidad, unida a su espectacular naturaleza, ha contribuido a su popularidad. Cross y un grupo de hológrafos fundaron la Multiplex Company en San Francisco y su trabajo ha sido ampliamente divulgado. Fueron ellos quienes elaboraron el holograma multiplex de la cabeza del actor Michael York para una escena de la película *La fuga de Logan* en la que se simula un interrogatorio de la policía del s. XXIII. El más famoso de sus hologramas es el denominado *El beso*, en el que aparece Pam Brazier lanzando un beso a los espectadores. Existen abundantes copias de dicho holograma en diversos formatos que se pueden obtener en numerosos lugares, entre los que figuran el museo de holografía, la Edmund Scientific Corporation de Barrington, Nueva Jersey y la Holex, de Filadelfia.

Hay limitaciones evidentes. Por estar formados por hologramas de arco iris, los multiplex adolecen de la misma falsedad cromática que éstos, y por constar de solamente unas mil tomas, duran —a la velocidad de las películas convencionales— menos de un minuto.

Al parecer falta todavía mucho para que puedan realizarse películas holográficas propiamente dichas. Un equipo ruso intenta lograr la reproducción de imágenes móviles holográficas proyectándolas sobre una pantalla reflectante especial, que crea a su vez una imagen independiente en cada butaca del auditorio. El espectador se ve obligado a mirar siempre en la misma dirección, lo cual, según Benton (que presenció una proyección) es como tener que ver el espectáculo por el ojo de la cerradura. En 1976, el equipo ruso pasó una película monocromática de 20 segundos en la que una joven arreglaba unas flores, pero sólo cuatro personas podían presenciarla a la vez.



El más famoso de los hologramas multiplex es el titulado El beso, y en él se ve a Pam Brazier lanzando un beso al público. Si caminamos alrededor del holograma descubrimos que Pam no sólo no deja de mirarnos, sino que, además, nos guiña un ojo. Multiplex Company

Además, para impresionar cualquier tipo de película holográfica se precisaría luz coherente, por lo que todas las escenas deberían ser filma-

das inevitablemente en interiores. Por otra parte, el hecho de iluminar a los actores con luz láser presenta graves peligros para la vista: en las películas holográficas probablemente escasearían los primeros planos.

¿SERÍA USTED CAPAZ DE CREER EN... LA TELEVISIÓN HOLOGRÁFICA?

Nosotros, no. Por lo menos no en un futuro inmediato. Todos los problemas relacionados con el cine holográfico —y muchos más— serían también aplicables a la televisión. En primer lugar, sería necesario disponer de algún medio para transmitir toda la información contenida en los hologramas hasta los hogares de los telespectadores y parece ser que a pesar del progreso realizado en la interpretación de señales su transmisión equivaldría aproximadamente a la de 500 canales de televisión en color. Esto sería lo que las fibras ópticas de alta calidad quizá podrían llegar a realizar en un futuro próximo (véase el capítulo 6).

Aun así, sería necesario disponer del equivalente holográfico de una cámara de televisión con una resolución de unas dos mil líneas por milímetro para poder grabar adecuadamente un holograma, lo que en estos momentos está totalmente fuera del alcance de las cámaras existentes.

También sería preciso disponer de algún medio para reconstruir el holograma, que variase su transparencia o reflectividad de acuerdo con la señal transmitida y con una resolución similar a la de la cámara holográfica. Recordemos que los receptores de televisión en Estados Unidos usan un total de 525 líneas y los europeos 625.

Finalmente, sería necesario disponer de algún medio para reconstruir la imagen a partir de la pantalla holográfica y puesto que la reconstrucción es altamente sensible al ángulo de visión, sólo se podría contemplar la imagen desde ciertos lugares de la sala. Aunque éste no sería sino uno de los problemas de menor importancia.

Los hológrafos se resisten a admitir la palabra imposible y se interesan todavía por la televisión. Uno de ellos asegura que quizá nuestros nietos lleguen a verla. Otro parece haber afirmado que sería capaz de resolver el problema en un par de años a lo sumo, si dispusiese de la totalidad del presupuesto de las Fuerzas aéreas durante dicho período.

ARTE, JUEGOS, PUBLICIDAD, Y PORNOGRAFÍA

El arte y los espectáculos constituyen el uso más visible de la holografía. Sus imágenes tridimensionales atraen la atención del público, lo cual resulta de gran utilidad en la publicidad. Son también muy atractivos ya sea como pendientes o colgados de las paredes de las salas de recepción. Existen numerosas pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de joyas holográficas y Stephen Benton calcula que «casi un millón de norteamericanos tienen hologramas en sus casas, en sus despachos, o los llevan colgados como adorno...» Muchos millones de personas los han visto, ya sea directamente en el museo de holografía o en alguna exposición, o indirectamente como en *La fuga de Logan.* Otros *creen* haberlos visto; pero en realidad lo que han presenciado ha sido alguna imagen tridimensional lograda por algún otro procedimiento, como en el caso de la casa encantada de Disneylandia o en *La guerra de las galaxias.*

Los hologramas han hecho también su aparición en el mundo de los juegos electrónicos. Uno de ellos es el denominado *Cosmos* que ha sido elaborado por Atari, en el que se usan cartuchos intercambiables para programar las diferentes variaciones del juego y en cada uno de ellos se encuentran dos hologramas. Durante el transcurso del juego unos diodos emisores de luz (LED) reconstruye una imagen holográfica en una pantalla de 90×100 mm que se mantiene fija durante la mayor parte del juego, para ser sustituida por otra en los últimos momentos.

Durante su versión del juego de los «marcianitos», se proyecta una panorámica tridimensional de la luna, hasta el momento cumbre en que su imagen es sustituida por la de un monstruo extraterrestre.

Cosmos no es el primer juego en el que figuran los hologramas. Al parecer, el honor le corresponde a *Gunsmoke*, que no es un juego doméstico, sino de los que uno acostumbra a encontrarse en los bares; *Gunsmoke* contiene el holograma multiplex de un pistolero que comienza por retar al jugador a un duelo. Si el jugador es el primero en disparar, el pistolero cae al suelo; pero en el caso contrario, y después de haber disparado, enfunda nuevamente su revolver con una sonrisa, al tiempo que la máquina anuncia: «¡Has perdido!»

Se fabricaron unos 3.000 juegos de *Gunsmoke* para la empresa japonesa Kansaiseiki y otros 750 para la Midway de Chicago. Si bien los fabricantes de juegos acostumbran a ser grandes organizaciones, la pro-

ducción de hologramas está en manos de la pequeña industria. El juego fue concebido por una pequeña empresa de Santa Clara, California, y su presidente Leonar Gesenway, interpretó el papel de pistolero para el holograma, cuya realización corrió a cargo de la Multiplex Company.

También se ha utilizado la holografía para fines meramente publicitarios, como en el anuncio de los cigarrillos Salem de la gran estación central de Nueva York. Existen además, algunos hologramas multiplex pornográficos, de tono generalmente moderado (en uno que tuvimos la oportunidad de observar aparecían dos mujeres desnudas que se acariciaban mutuamente), que suelen aparecer en certámenes de técnica industrial donde atraen la atención del público predominantemente masculino no sólo por su tema sino por su avanzada técnica.

Si bien la publicidad y la pornografía constituyen probablemente sus aplicaciones más rentables, el interés de numerosos hologramas radica en el arte. Lamentablemente, la holografía para los artistas en un hueso duro de roer. Son poquísimos los que cuenten con una formación tecnológica y sin embargo la elaboración de hologramas de alta calidad exige conocimientos técnicos avanzados. Además, es preciso disponer de costosos aparatos y generalmente los artistas padecen la pobreza endémica que les ha caracterizado a través de los tiempos.

Para solventar dichos problemas se han perfeccionado ciertos métodos relativamente baratos destinados a la confección de hologramas. En vez de servirse de aparatosas mesas ópticas, por ejemplo, muchos de ellos utilizan cajas de arena. Evidentemente no se trata de los típicos cajones donde acostumbran a jugar los niños en los patios traseros de las casas, sino de un modelo cuyo diseño se atribuye al holágrafo Gerry Pethick, que consiste en una caja de ladrillos repleta de arena lavada, colocada sobre neumáticos de motocicleta y los componentes ópticos en tubos de plástico parcialmente hundidos en la arena. Los neumáticos evitan que las vibraciones del suelo sean transmitidas a la mesa y la arena le proporciona estabilidad sin transmitir tampoco vibración alguna.

Por lo general los entornos son humildes. Dan Schweitzer y Sam Moree trabajan en los laboratorios holográficos de Nueva York, en los sótanos de un teatro situado en 34 oeste de la calle Trece de Manhattan. En algunas ocasiones el ruido del teatro les causa problemas, pero los artistas procuran solventarlos tomando medidas, como por ejemplo la de desconectar el aire acondicionado cuando impresionan algún holograma.

El museo de la holografía cuenta también con un laboratorio en el sótano, pero su equipo es más avanzado.

Algunos de los resultados obtenidos son asombrosos no sólo por su novedad, sino también por la imagen artística que contienen. En su obra titulada *Twelve Milliwatt Boogie* el hológrafo neoyorquino Rudie Berkhout superpuso tres holograrnas de arco iris para producir una imagen multicolor de diversas figuras geométricas que flotan en el espacio, cambian de color con los movimientos de la cabeza del observador y en algunos casos distorsionándose debido a las limitaciones de la grabación holográfica. Berkhout denomina los efectos inducidos por la distorsión «hiperespacio» y procura utilizarlos creativamente.

Un paseo por el museo de la holografía permite que uno se dé cuenta de la diversidad existente de imágenes holográficas. Entre los artistas que han protagonizado exposiciones se cuentan Harriet Casdin-Silver, del Centro de estudios visuales avanzados del Instituto de tecnología de Massachusetts, Rubén Núñez, de Venezuela, Carl Frederick Reuterswald, de Suecia, y Anait Stephens, de California.

Uno de los principales problemas del personal del museo consiste en instalar los hologramas de forma que consigan los mejores efectos, puesto que la calidad de las imágenes reconstruidas depende enormemente de la iluminación utilizada. Tenemos, por ejemplo, el holograma de arco iris de un clavel elaborado por dos artistas de San Francisco, Randy James y Gustavo Houghton que, cuando recibe la luz del sol por el ángulo adecuado, es realmente espectacular, pero que, de otro modo, es borroso y carece de interés.

Además de tratarse de un medio creativo, la holografía se utiliza para la preservación de otras obras de arte gracias a su facilidad para detectar tensiones y deformaciones en los cuadros antiguos o en sus telas. La técnica utilizada se denomina *interferometría holográfica.* No sólo sirve de ayuda a los historiadores del arte, sino que juega también un importante papel en la industria; a continuación aclararemos cómo cumple su cometido.

INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA: PRUEBAS EN LA TERCERA DIMENSIÓN

Anteriormente se ha descubierto la forma en que las ondas electromagnéticas son susceptibles de interferir entre sí para producir una figura de franjas luminosas y oscuras. En el capítulo 9 hemos explicado como se pueden utilizar las interferencias para medir pequeñas distancias, incluso menores que la longitud de onda de la luz. La interferometría normal nos permite medir la distancia que separa dos objetos, pero con la holográfica podemos evaluar las distancias que medien entre diversos puntos de las imágenes holográficas reconstruidas.

Supongamos que nos proponemos inspeccionar el neumático de un avión. En primer lugar elaboraríamos un holograma de dicho neumático en condiciones normales y a continuación, sin mover ni la placa ni el neumático, grabaríamos un nuevo holograma sobre la misma placa al tiempo que sometíamos el neumático a un chorro de aire caliente.

El resultado consistiría en un holograma de doble exposición, es decir, una superposición real de dos hologramas impresionados sobre la misma placa fotográfica. Al ser reconstruido se obtendrían las dos imágenes superpuestas, pero puesto que no había habido desplazamiento alguno se vería una sola imagen del neumático. Sin embargo, superpuesta a la imagen aparecería también una figura de interferencia compuesta de líneas claras y oscuras que indicarían los cambios experimentados por el neumático bajo el efecto del aire caliente. En el caso de que tuviese algún defecto diminuto se manifestaría en forma de punto en el lugar donde abundasen franjas de interferencia. Esta técnica es sumamente eficaz y, en realidad, constituye el único método autorizado por las autoridades federales norteamericanas de aviación para realizar dichas pruebas.

El mismo principio puede ser aplicado a muchos tipos de ensayos no destructivos, es decir, aquellos en los que no se perjudique el objeto sometido a comprobación. Es posible, por ejemplo, verificar la dureza de una pieza de metal soldada que deba ser ligeramente doblada, comparando una doble exposición holográfica obtenida antes y después de doblarla. También se ha utilizado la interferometría holográfica para medir el flujo de líquidos y gases, los efectos de puentes ortodónticos (como se ha

descrito en el capítulo 5) e incluso las vibraciones de antiguos instrumentos musicales chinos.

¿Qué relación tiene con el arte? El caso es que debido a que el sistema de interferometría holográfica es no destructivo permite examinar el estado de conservación de obras antiguas y muy frágiles. Un equipo de las universidades de Aquila y de Roma se sirvió de dicho método para observar la separación entre diversas capas de pintura en un cuadro del siglo XV ejecutado sobre madera. Para lograrlo, tomaron exposiciones dobles en primer lugar del cuadro en su estado normad y, a continuación sometiendo su superficie a un chorro de aire caliente. El resultado de la prueba fueron una serie de franjas distribuidas con regularidad en los lugares donde la pintura estaba debidamente adherida a la madera, y con las correspondientes desviaciones en los lugares donde no lo estaba.

HOLOGRAFÍA INDUSTRIAL

La interferometría holográfica parece constituir el uso primordial de la holografía en la industria y sin embargo los industriales prefieren no hablar de ello. Para comprender sus razones debemos examinar brevemente la historia.

El descubrimiento, en 1963, de la holografía de reflexión basada en el láser facilitó el desarrollo de la interferometría holográfica, que una media docena de equipos de investigadores perfeccionaron simultáneamente entre 1963 y 1964.

Una muestra de la euforia que invadió a los investigadores a principios de los años 60 la constituyen las numerosas patentes otorgadas durante aquella época, entre otros a Leith y Upatnieks. Una gran parte de dichas patentes fue adquirida más adelante por Holotron Inc. de Golumbus, Ohio, empresa fundada por el Battelle Memorial Institute y la compañía Du Pont. Durante varios años, Holotron intentó cobrar en vano los derechos de sus patentes y finalmente sus propietarios optaron por vender la compañía a una empresa denominada Holosonics Inc., de Richland, Washington, que tampoco consiguió cobrar derecho alguno. La suerte no acompañó tampoco a Holosonics en otros aspectos y cuando finalmente quebró, su principal activo lo constituía sus patentes, que pasaron a manos de los administradores de la deuda.

No se conoce con certeza la validez de esas patentes, ya que, al parecer, no han sido puestas jamás a prueba ante un tribunal de justicia, pero el problema principal con el que tanto Holotron como Holosonics tuvieron que enfrentarse fue el de localizar a sus usuarios. Los vendedores de hologramas acostumbran a ser artistas o pequeñas empresas, con la mayoría de los cuales no vale la pena entablar un pleito debido a la modesta naturaleza de sus ventas.

Los industriales no adquirirían hologramas, sino los instrumentos ópticos necesarios para elaborarlos, pero eso no era muy significativo en sí mismo, puesto que los mismos aparatos podrían utilizarse para otros fines. Además, la holografía puede practicarse perfectamente en secreto, sin que Holotron o Holosonics lleguen a enterarse de ello. Por consiguiente, ante la espada de Damocles que supone la posibilidad de un pleito por infringimiento de patentes, es comprensible que la mayoría de las empresas prefieran no hacer comentarios acerca de las técnicas que utilizan.

Actualmente los administradores de Holosonics han comenzado a vender «permisos exclusivos» para el uso de las técnicas holográficas descritas en las patentes para aplicaciones varias. El permiso para pruebas de laboratorio y ensayos no destructivos (que incluye la interferometría holográfica) ha sido adquirido por Newport de Fountain Valley, California, fabricantes de instrumentos holográficos que confían en ganar algún dinero autorizando el uso de su patente a usuarios industriales. Ofrecerán también equipos completos de holografía industrial sin temor a infringir patente alguna. Pero la compañía no se interesa sólo por los negocios. Su vicepresidente, Milton Chang, nos ha dado la impresión de que desean sinceramente contribuir al progreso de la holografía. Tanto el señor Chang como el presidente de la empresa, su principal científico y director de proyectos avanzados, se doctoraron en holografía en el Instituto de tecnología de California.

Las crecientes presiones sobre el control de calidad de los productos contribuirán quizás a que se divulgue el uso de la holografía en la industria. Otro tanto puede que ocurra con el descubrimiento de nuevos progresos tecnológicos, como por ejemplo el de una nueva película que se revele automáticamente en pocos segundos y que pueda borrarse para ser utilizada de nuevo, lo que es evidentemente ideal para la inspección por

interferometría holográfica cuando no sea necesario archivar los resultados de la prueba.

HOLOGRAMAS ARTIFICIALES

En teoría, la holografía es una técnica óptica de infinitas posibilidades puesto que permite generar el tipo de frente de ondas que se desee. Hasta ahora hemos hablado simplemente de conservar algún frente ya existente con el fin de reconstruirlo más adelante en la producción de una imagen, pero esto no es sino el principio de las posibilidades de la holografía.

Los científicos la ven a veces como el equivalente de la compleja función matemática denominada transformada de Fourier (véase el capítulo 11). Sería superfluo entrar en detalles, pero es importante el hecho de que sea posible describir matemáticamente un holograma y el objeto que representa. El modelo matemático permite que una computadora sintetice hologramas, los cuales pueden ser dispuestos para que representen un objeto específico o, con mayor frecuencia, ciertas operaciones matemáticas.

También es posible servirse de los hologramas para realizar las funcionas de complejas lentes, espejos u otros componentes ópticos. Un ejemplo práctico lo constituye el explorador holográfico elaborado por IBM, el cual puede moverse de tal manera que provoque variaciones en la dirección de un haz de luz, haciéndole seguir una forma geométrica determinada que permita leer la información codificada en forma de líneas (CUP) sobre los paquetes de productos vendidos en los supermercados (véase el capítulo 11). Con la ayuda de una lente holográfica es posible proyectar información frente a la línea de visión de los pilotos de aviones militares, con el fin de que no se vean obligados a desplazar la mirada para leer sus instrumentos. La función de una lente holográfica es similar a la de una lente normal, pero de un tipo que no sería práctico fabricar.

Hasta estos momentos ni los hologramas generados por computadora ni los elementos ópticos holográficos han encontrado muchas aplicaciones, tanto los unos como los otros adolecen de ciertos defectos para su puesta en práctica, pero ofrecen emocionantes perspectivas si éstos se solventan.

HOLOGRAFÍA SIN LÁSER

Evidentemente nos hemos referido a la holografía que utiliza láseres, puesto que éstos representan la mejor fuente luminosa para dicho proceso: pero la holografía es principio general que puede aplicarse a cualquier tipo de ondas, no sólo a las luminosas.

Se han realizado hologramas con la ayuda de microondas y es posible servirse de ondas ultrasónicas (ultrasonidos) para el mismo fin. La holografía acústica cuenta con diversas aplicaciones en la investigación y en ensayos no destructivos.

No olvidemos que el propósito inicial de Dermis Gabor era el de mejorar la resolución del microscopio electrónico. Puede que quienes hayan seguido cuidadosamente todo lo que hemos dicho hasta ahora se pregunten en qué se basaba Gabor para aplicar un proceso típicamente ondulatorio a un haz de electrones, pero el caso es que los electrones comparten algunas de las propiedades de las ondas, al igual que las ondas electromagnéticas comparten las de las partículas. Es posible difractar electrones y la difracción es la base de la reconstrucción de un holograma. Por consiguiente existe también la posibilidad de paralizar en un momento dado un frente de onda de electrones. Paradójicamente, la primera aplicación imaginada por Gabor no se ha convertido, todavía, en una realidad práctica.

13. EL LÁSER COMO ESPECTÁCULO

La holografía no es la única aplicación del láser en el mundo del arte y del espectáculo. Otra expresión artística la pueden constituir meros haces de luz de vivos colores que contrasten con la oscuridad de sus entornos. ¡Convirtamos las pinturas en haces luminosos y demos rienda suelta a la imaginación de los artistas: ha llegado el láser!

En realidad puede que algunos lo hayan experimentado ya, especialmente si viven cerca de alguna gran ciudad. Los espectáculos luminosos láser han sido presentados en planetarios y teatros del mundo entero, incluso durante la ceremonia de investidura del presidente Reagan.

Los láseres también pueden interpretar un buen papel en la industria del ocio, puesto que es uno de los tres sistemas con los que se pueden reproducir discos de video y quizá constituyan la próxima etapa de la revolución de los espectáculos visuales. Magnavox y la Pioneer Electronics Corporation venden aparatos dotados de láseres de helio-neón para «leer» discos de video. En dichos aparatos se utilizan para reproducir las señales televisivas grabadas en discos reflectantes. Su función es similar a la de la aguja de un fonógrafo que reproduce la música grabada en los surcos de un disco, aunque mucho más delicada.

Antes de permitir que nos arrebate el entusiasmo recordemos que el mundo del espectáculo es eminentemente ilusorio. Tampoco faltan los cínicos que arguyan convincentemente que el disco de video es la respuesta de la alta tecnología al oro de los alquimistas. Algunos espectáculos visuales han fracasado rotundamente, y en otros se ha puesto en peligro la seguridad del público al dirigir hacia los espectadores haces láser sin el debido cuidado. Y hay artistas que se preguntan si el láser no es más que un mero truco, cuyo atractivo radica más en el hecho de que se trate precisamente de un láser que en su mérito artístico.

Inevitablemente la realidad se encuentra entre ambos extremos. Los láseres pueden producir efectos verdaderamente espectaculares en manos de artistas de talento, si bien los constreñimientos tecnológicos limitan por otra parte lo que se puede llegar a hacer con ellos. Los espectáculos luminosos pueden ser maravillosos, pero con el tiempo y la repetición quizá lleguen a aburrir. Y las ventajas de los videodiscos, que es lo que

realmente importa en el campo comercial, brillan todavía por su ausencia.

EL LÁSER Y EL ARTE CINÉTICO

La mayor parte del arte láser es, fundamentalmente una subcategoría del arte cinético en la cual el movimiento forma parte integral de la expresión artística. Existen múltiples métodos para producir dicho movimiento, generalmente en coordinación con la música. Debido a su propia naturaleza, el arte cinético tiende a ser altamente tecnológico y es perfectamente comprensible que sus discípulos hayan optado por el uso del láser.

La incorporación sistemática de los láseres en el arte cinético no tuvo lugar hasta finales de los años sesenta. El problema radicaba en las limitaciones de los primeros láseres, ya que sólo el actualmente divulgadísimo modelo de helio-neón producía el tipo de haz continuo que se precisa. Sin embargo, a pesar de que su precio era —y sigue siendo— relativamente moderado, su insípido haz de color rojo carecía de emoción para la expresión artística. Existen múltiples métodos para producir dicho movimiento, el mercado un nuevo modelo que contenía el gas noble criptón y era capaz de emitir varias líneas de brillantes colores en la gama visible, brindándole por primera vez al artista una paleta de colores.

Hemos mencionado las dificultades económicas a las que se enfrentan los holágrafos, pero las de los artistas que desean utilizar el color son todavía mucho más severas. Hoy uno puede instalarse un equipo holográfico por unos centenares de dólares, aunque si la inversión es mayor también mejorará la calidad de los hologramas; sin embargo, el precio mínimo de un láser de criptón (o el de un modelo combinado de criptón y argón) es de unos 10.000 dólares, sin incluir los accesorios necesarios para dirigir y modular el haz de luz con el fin de crear diseños interesantes. Debido, por tanto, al elevado coste de los aparatos, los láseres multicolores no están al alcance de los artistas aquejados de dificultades pecuniarias, a no ser que reciban ayuda exterior o comercialicen su arte cobrando entradas.

EL PABELLÓN DE LA PEPSI

Una de las primeras demostraciones de arte láser a todo color tuvo lugar en el pabellón de la Pepsi-Cola en la Expo '70 de Osaka en Japón. Los láseres sólo formaban parte de un fascinante experimento tecnológico que tuvo lugar literalmente en el sótano del pabellón bajo el título de «Experimentos de arte y tecnología», que corrió a cargo de setenta y siete artistas y técnicos. La historia de aquel pabellón ha sido recopilada en un libro publicado en 1972 por Dutton, de Nueva York, pero en estas páginas nos ocuparemos exclusivamente de los aspectos relacionados con el láser.

La idea de un espectáculo láser fue concebida por el compositor David Tudor, pero quienes proyectaron el sistema fueron, en realidad, Lowelll Cross (actualmente miembro de la Escuela de música de la universidad de Iowa) y Carson Jeffries, físico de la universidad de California en Berkeley. Se propusieron descomponer el haz de luz en los cuatro colores que lo componían y, a continuación, utilizar la música para activar los controles electrónicos de unos espejos móviles que dirigirían los haces por la sala, sirviéndose de varios espejos para cada color.

Su puesta en funcionamiento se convirtió en una verdadera aventura. Cuando recibieron el láser que les había remitido el laboratorio Coherent Radiation (actualmente Coherent Inc.) desde Palo Alto, California, el tubo de criptón en su interior estaba roto. Un segundo tubo que mandó la misma empresa también llegó a Japón deteriorado. El tercer tubo llegó en la víspera de la inauguración del pabellón, y Cross y Elsa Garmire (físico especialista en láser, en aquella época, del Instituto de tecnología de California y, actualmente, de la universidad del sur de California) trabajaron hasta después de la medianoche para instalarlo. Al día siguiente se reincorporaron al trabajo a primera hora de la mañana y no lo concluyeron hasta las 12:50, diez minutos antes de la ceremonia inaugural, durante el transcurso de la cual se había programado utilizar el láser en cuestión.

El resultado fueron unas series de líneas rojas, amarillas, verdes y azules entrelazadas que se desplazaban por aproximadamente la mitad de la sala de proyección. A pesar de que se dirigieron los haces a la cara y ropa de los visitantes, parece ser que no causaron problema alguno. El efecto fue asombroso. Un crítico de arte lo calificó de «Pollock eléctri-

co», en honor al renombrado artista que confecciona sus cuadros arrojando la pintura sobre las telas.

LIMITACIONES

Transcurrida una década, Cross y Jeffries trabajan todavía juntos sirviéndose de la música para controlar los haces de luz que deben manifestar el mismo género de imagen artística y que, según Cross, constituye la clave de lo que actualmente se necesita. Le gustaría explorar más a fondo los sistemas de control computarizados, pero en los últimos años el progreso tecnológico en ese campo concreto ha sido muy moderado.

El propio láser de criptón sigue siendo caro y delicado, a pesar de que ha mejorado ligeramente en los últimos tiempos. Cross narra historias tremendas acerca del transporte de su frágil láser a los espectáculos alejados de su ciudad de Iowa. En una ocasión descubrió que la caja en la que se encontraba había sido colocada en sentido vertical, a pesar de las evidentes indicaciones para que se mantuviese en posición horizontal. El error le costó al transportista el precio de un nuevo tubo láser.

La refrigeración ha constituido en todo momento una grave preocupación en las exhibiciones en las que se usan láseres de criptón o de mezclas de gases. Se cuenta que cierto artista dejó tras de sí una ruta plagada de fracasos debido a que no prestó suficiente atención a las necesidades de refrigeración. Los láseres de criptón de mayor potencia generalmente deben ser refrigerados con agua corriente, si bien para los menores suele bastar un ventilador de aire y debido a que los helio-neón además de ser más baratos, así como de fácil manipulación, no precisan de refrigeración alguna, se utilizan también para algunos trabajos artísticos.

La mayor limitación tecnológica en el campo artístico no la presenta sin embargo, el láser, sino la forma de dirigir el haz de luz. Existen varios métodos para conseguirlo, pero el más idóneo para los espectáculos luminosos es el de los espejos giratorios, es decir los que están montados sobre un eje que les permite girar hasta un ángulo de casi 30°, igual al que cubrirá un haz reflejado por dicho espejo. Cuando se desea proyectar un diseño bidimensional se refleja sucesivamente el mismo haz en dos espejos móviles. Generalmente la luz procedente de los láseres de criptón

se descompone en sus colores constituyentes y se usan dos espejos independientes para cada uno de ellos.

Los espejos se controlan electrónicamente, pero su mecanismo motriz es mecánico y al igual que los demás de su mismo género está sujeto a las limitaciones propias de la mecánica. Incluso los mejores espejos no logran superar los 2.000 desplazamientos por segundo, cuya velocidad es en todo caso lo suficientemente rápida como para que el ojo perciba el diseño y no un punto luminoso que se desplaza. Sin embargo es demasiado lento para mantener a la vista ciertos diseños de considerable complejidad sin que se desintegren parcialmente.

La limitada capacidad del láser para proyectar imágenes es evidente si lo comparamos con la televisión. En Estados Unidos, el haz de electrones que produce la imagen de los televisores en blanco y negro se desplaza sobre la pantalla a razón de 15.000 veces por segundo (30 cuadros distintos de 525 líneas cada uno), mientras que la velocidad del láser es tan sólo de 2.000. Además, la pantalla de televisión contiene fósforo que sigue emitiendo luz incluso después de que haya desaparecido el haz, con lo que logra crear la ilusión de una imagen permanente, cuando en realidad se trata de un solo punto luminoso que se desplaza. Dicha limitación del láser constituye la razón por la cual sólo puede trazar simples dibujos y su consiguiente incapacidad para reproducir imágenes de estilo fotográfico similares a las de la televisión.

Incluso los simples dibujos son de difícil consecución para los espejos. Cuando funcionan a la velocidad más elevada producen un ruido que puede llegar a oírse en algunos espectáculos luminosos. La calidad de las simples imágenes se ve también limitada por otro problema que los ingenieros denominan «zumbido» (ringing) y que consiste en que el espejo no se detiene exactamente en el lugar previsto, produciendo en su lugar cierta vibración que hace que el punto luminoso oscile.

A pesar de que dichos problemas limitan considerablemente la labor de los artistas, no por ello dejan de crear algunas imágenes verdaderamente interesantes. Si los instrumentos direccionales funcionan a una frecuencia estable constante, en lugar de exigirles que dibujen imágenes específicas, sus diseños pueden ser fascinantes y, por lo visto, de gran complejidad. Algunas de las imágenes recuerdan a las que se obtienen con un espirógrafo infantil, llenas de ruedas y aros dentados, y el fenómeno es en realidad semejante en ambos casos. Al accionar ambos espe-

jos a frecuencias diferentes simultáneamente el haz produce un dibujo repetitivo que depende de la relación entre las dos frecuencias utilizadas, al igual que el del espiró- grafo está determinado por el número de dientes de cada rueda. Dichos dibujos constituyen la especialidad de numerosos artistas y de ciertos espectáculos luminosos tales como el *Laserium*, y frecuentemente están sincronizados con la música o producidos por ella. Además, su realización es relativamente fácil.

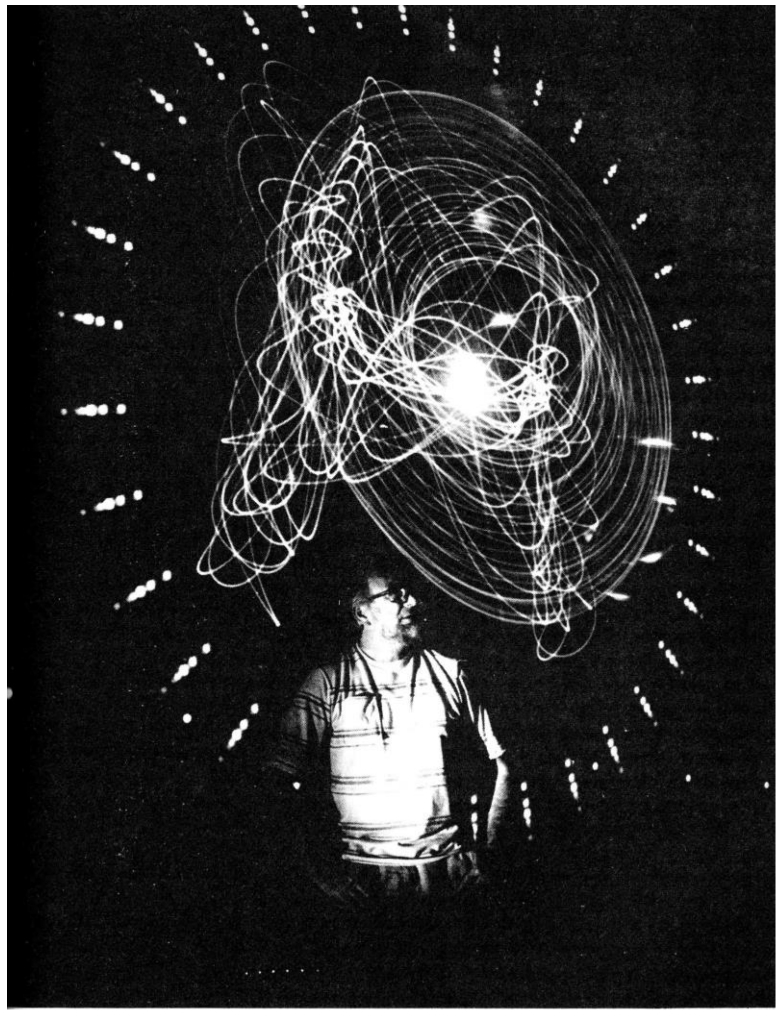
LOS PERFILES DEL ARTE LÁSER

A pesar de que cada artista puede plantearse la utilización del láser desde un punto de vista diferente, han aparecido ciertas características comunes, determinadas en algunos casos por limitaciones tecnológicas y en otros por una visión artística compartida.

El punto de partida para Cross, cuya formación es la de musicólogo, fue la música electrónica. Su interés por las interacciones entre luz y la música le indujeron a experimentar con equipos de láser dirigidos por varios tipos de música. En su opinión, el mejor sonido para ello es el de las orquestas sinfónicas, y asegura que de ese modo ha producido los espectáculos visuales que de mayor éxito han gozado entre el público. También cree que la música rock, que es la que se acostumbra a utilizar en espectáculos luminosos, «no ofrece grandes posibilidades artísticas». Actualmente se interesa por las técnicas electrónicas que controlan los láseres.

Otro artista a quien le atraen las interacciones entre la luz y la música es J. Stanislaus Ostoja-Kotkowski, de origen polaco y residente actualmente en Stirling, Australia meridional, Ostoja-Kotkowski se autodefine como un pintor con un pincel láser. La mayor parte de su trabajo es de estilo cinético en el que se combinan haces de luz láser (dirigidos generalmente por música) con «manchas» de color producidas por lámparas incandescentes. Sus creaciones han aparecido en numerosas ocasiones en Australia y en otros países. Una de las más espectaculares la constituyó la titulada *Láser Chromasonic Tower* que presentó en el Festival de arte y ciencia de Canberra, Australia, en 1975. Luces incandescentes y láseres dirigidos por música se desplazaban por las paredes translúcidas de una torre instalada en un pequeño lago en cuyas aguas se reflejaban. Durante

la noche las luces de la torre producían un espectacular contraste con la oscuridad del entorno.



J. Stanislaus Ostoja-Kotkowski, junto a una de sus creaciones controladas por música, durante el festival de arte de Adelaida, Australia (1980). R. Nicholson

A pesar de que las visiones artísticas de Cross, Ostoja-Kotkowski y muchos otros difieran considerablemente, también tiene mucho en común. Los que trabajan en grandes espacios suelen utilizar láseres de argón, criptón o mixtos, mientras que los que lo hacen en zonas reducidas (o aquellos cuyo presupuesto es reducido) se sirven, por lo común, de los de helio-neón con su típico haz de luz rojo. Inevitablemente todos usan algún sistema mecánico para dirigir los haces multicolores, cuya intensidad puede ser modulada por diversos métodos. Existen también unos aparatos conocidos con el nombre de «choppers»[2] cuya función consiste en interrumpir totalmente el haz de luz en determinados instantes, aunque en otros casos la intensidad puede ser controlada de forma continua. Los haces de luz se proyectan sobre nubes, pantallas, estructuras especiales o incluso niebla producida intencionadamente.

En general los artistas parecen interesarse por la cinética de los haces láser. Lo más común es que sea el artista quien los controle directamente desde una cabina, o que haya preparado un programa en cinta que dirija los espejos mecánicos. También es frecuente que dicha operación haya sido sincronizada —o incluso controlada directamente— con la música.

EL LÁSER COMO ESPECTÁCULO

Algunas de las ideas que han intrigado a los artistas han sido comercializadas en un subgénero de la industria del espectáculo, dando origen a las representaciones luminosas láser. El mayor y mejor conocido de dichos espectáculos es el titulado *Laserium*, realizado por Láser Images Inc., de Van Nuys, California, que en realidad ha sido modificado en varias ocasiones y que en 1980 llegó a ser presenciado por más de nueve millones de espectadores.

El origen de Láser Images Inc. se remonta a 1971 cuando Elsa Garmire, a su regreso al Instituto de tecnología de California después de haber trabajado en el pabellón de la Pepsi en Japón, introdujo al joven cineasta Ivan Dryer en el arte láser. Al principio Dryer se propuso realizar una película con imágenes producidas por láser, pero cuando comprendió que no lo lograría decidió intentar un espectáculo en directo.

---

[2] Se utiliza habitualmente esta denominación.

En 1971 fundó Láser Images, que durante un par de años sobrevivió penosamente en el anonimato. Su primer gran éxito lo constituyó el *Laserium* original que se inauguró en el Griffith Planetarium de Los Angeles. A partir de aquel momento la empresa prosperó hasta llegar a contar con 110 empleados, que presentan permanentemente espectáculos en doce ciudades alrededor del mundo (Denver, Las Vegas, Londres, Nueva York, Philadelphia, Saint Louis, San Francisco, Seattle, Tokyo, Toronto y Washington). Su espectáculo ha sido modificado en varias ocasiones y ha sido presentado por temporadas en muchas otras ciudades del mundo, generalmente en planetarios cuyas cúpulas constituyen un fondo ideal para las imágenes proyectadas por los láseres.

El corazón del *Laserium* lo constituye un proyector en el que se encuentra un láser de criptón, circuitos electrónicos de control, espejos direccionales, mandos y un magnetófono de cuatro pistas, dos de las cuales se utilizan para reproducir música estereofónica, otra para la voz del narrador y la cuarta contiene la información necesaria para controlar el proyector en sincronía con la música.

Su extraordinario éxito se debe en parte al hecho de que en todos los espectáculos el encargado de manejar el proyector es un «laserista» íntimamente familiarizado con los aparatos que manipula. Durante el espectáculo se instala en una cabina con mandos electrónicos que le permiten modificar las imágenes creadas por el proyector. La mayoría de los laseristas son músicos y su función es en cierto modo análoga a la de los técnicos de grabación en los estudios o recitales. Gracias a la colaboración de esos especialistas, Láser Images evita el problema de la repetición característico de todo espectáculo pregrabado. Cada recital es único, irrepetible.

En algunos de sus recitales han utilizado música clásica. En el *Laserium* original, por ejemplo, se sirvieron de la música de Johann Strauss, *El Danubio Azul.* Sin embargo ha predominado la música contemporánea, en cuyo reparto han figurado desde piezas relativamente antiguas, como *Roll Over Beethoven*, de Chuck Berry o *Heartbreak Hotel*, de Elvis

Presley, hasta otras de mayor actualidad, como *Sultans of Swing*, de Dire Straits, y *Just What I Needed*, de The Cars.

Los demás espectáculos láser siguen también una pauta similar y se sirven predominantemente de música rock, debido en gran parte a que atrae una mayor cantidad de público y por consiguiente es más comer-

cial. También es cierto que fue precisamente en los recitales de rock de la sicodélica era de los sesenta donde la iluminación comenzó a formar parte del propio espectáculo, y algunas piezas de aquella época, como *Light My Fire*, de los Doors, *White Rabbit*, de Jefferson Airplane y *Purple Haze*, de Jimi Hendrix, han sido incluidas en el *Laserium.* Existen otras características que denotan la continuidad de la era sicodélica, como por ejemplo el frecuente olor a marihuana durante los espectáculos láser. Sin embargo, recientemente han aparecido nuevos problemas durante los recitales, como el provocado por unos gamberros borrachos que llegaron a interrumpir el espectáculo en el Hayden Planetarium de Boston.

A pesar de que los espectáculos titulados *Laserium* en los que la música contemporánea ha proporcionado la base de la iluminación han sido los que mayor éxito han obtenido, los ha habido también de otra índole. *Lovelight*, coproducida por Intermedia Systems Corporation y General Scanning Inc. (primeros suministradores de espejos dirigibles), fue concebida como una obra musical que incluía dibujos animados además de imágenes más abstractas. Se sirvieron asimismo del proyector del Hayden Planetarium de Boston para producir un fondo estrellado sobre el que aparecían las imágenes del láser. Su fragmentado desarrollo recordaba la última parte de la película de Stanley Kubrick *2001, una odisea del espacio*, pero al público pareció interesarle el tema y el espectáculo se mantuvo en cartel durante seis meses.

Los espectáculos y exhibiciones con láser aparecen en los lugares y momentos más inesperados. A lo largo del verano de 1980 fueron varios los que tuvieron lugar en conmemoración del 350 aniversario de la fundación de Boston, y como hemos ya mencionado se presentó también uno durante la ceremonia de investidura del presidente Reagan en Washington DC. Se ofreció además, un espectáculo láser durante la celebración del segundo centenario de la independencia de Estados Unidos el día 4 de julio de 1976, bajo el título de *Soleil*, que fue organizado por Bruce Rogers y Gary Levenberg y proyectado desde la cúpula del monumento a Washington. Se calcula que la presenciaron unos cuatro millones de espectadores y se asegura que sus haces de luz eran visibles a 30 kilómetros.

Los láseres han hecho también su aparición en infinidad de lugares diversos. Durante la época de máxima popularidad de las discotecas

algunas organizaron sus propios espectáculos. Una idea de la importancia de esa moda nos la da el hecho de que durante el año 1979 se instalaron en discotecas francesas unos setenta láseres de argón, criptón y mixtos, cantidad superior a la de los instrumentos adquiridos por los científicos del mismo país durante el mismo período.

Puede que el declive de las discotecas resulte decepcionante para los realizadores de espectáculos luminosos, pero nada indica que haya decrecido el interés en las proyecciones láser. Láser Images cuenta, por ejemplo, con una impresionante lista de contratos entre los que hay películas, programas de televisión, recitales musicales, lanzamientos de discos, ferias comerciales, espectáculos láser al aire libre y representaciones en parques de atracciones, como Knotts Berry Farm y Magic Mountain. Muchas otras empresas organizan exhibiciones láser, con nombres tan dispares como Láser Displays, de Boston o Science Faction, de Nueva York. En Suiza hay una empresa denominada Skyliner Promotion AG que alquila una furgoneta repleta de equipos para espectáculos luminosos por 7 000 dólares diarios y ofrece espacio publicitario en los espectáculos láser a unos 10 dólares por segundo.

LOS GRUPOS MUSICALES Y LOS PROBLEMAS DE SEGURIDAD

Los que mayor entusiasmo han mostrado por los láseres en el mundo del espectáculo han sido los grupos de música rock. Probablemente los más destacados han sido los componentes del grupo británico The Who con el apoyo prestado a la empresa denominada Holoco Ltd —responsable de los efectos especiales láser en la película *Outland*— en el desarrollo de la tecnología luminosa y holográfica. Otros grupos se han interesado por los aspectos espectaculares sin mostrar curiosidad alguna por la técnica, lo que ha causado ciertos problemas debido a que los músicos no han sabido comprender que un exceso de luz puede ser tan perjudicial como un exceso de sonido.

Un grupo de jóvenes especialistas ingleses construyeron un equipo láser e instalaron cuidadosamente todos los sistemas de seguridad necesarios para ser utilizado en un recital rock en Francia. Durante el concierto comprobaron horrorizados que los operadores del láser del grupo musical habían eliminado los sistemas de seguridad, permitiendo que los

haces de luz llegasen directamente a los espectadores. Concluido el recital, los especialistas ingleses se apresuraron a recoger sus aparatos para dirigirse a toda velocidad hacia la frontera belga, convencidos de que la policía francesa intentaría localizarles. Evidentemente no sabían que en aquella época en Francia no había ninguna norma restrictiva y que no fue en realidad hasta la primavera de 1979 cuando aparecieron en aquel país las primeras reglas de seguridad. En la actualidad, la policía francesa está obligada a verificar todos los equipos láser antes de que comiencen los espectáculos.

También se han dado casos de haces de luz recibidos por los espectadores de recitales de rock en Estados Unidos. Uno de los componentes de cierto grupo musical se colocaba un espejo en la muñeca con el que reflejaba un potente haz contra los espectadores y al parecer otros conjuntos han hecho cosas parecidas.

Lo extraordinario es que según parece, tales negligencias no causaron ningún daño. Los haces utilizados no pueden causar quemaduras de la piel, pero son capaces de infligir daños permanentes en los ojos. Un láser de un vatio es más de cien veces más intenso que la luz solar y puede crear un punto de ceguera permanente en la retina. El hecho de que no se conozca ningún accidente puede ser debido a la buena fortuna, a las eminentemente conservadoras precauciones y, quizás, a la simple dificultad en descubrir un pequeño punto de ceguera.

Con la intención de minimizar dichos peligros, la Oficina de salud radiológica (BRH) perteneciente a la Administración de comestibles y medicamentos, ha decidido controlar meticulosamente a los operadores de láseres y ha establecido rigurosas normas de seguridad. Dichas normas han logrado al parecer eliminar la mayor parte de las acciones peligrosas, debidas en general a la ignorancia, y no a la malicia. Sin embargo, las nuevas normas no están tampoco desprovistas de lamentables efectos secundarios, el más notable de los cuales consiste en el laberinto burocrático que los realizadores de espectáculos láser se ven obligados a atravesar y que, en la práctica, elimina la posibilidad de presentar un mismo espectáculo durante una serie de noches sucesivas en diferentes localidades. Por esta razón, algunos fabricantes de aparatos destinados a la industria del espectáculo han decidido presentar una queja en la que alegan que las normas de la BRH son innecesariamente rigurosas. Otros miembros de la comunidad láser han expresado criterios similares y han

asegurado que las nuevas normas están basadas en datos inadecuados. Las mismas fuentes suelen afirmar que en la mayoría de los casos se trataba simplemente de negligencia por parte de ciertos conjuntos musicales u operadores de láseres y que la reacción burocrática ha sido excesiva. También hay quien asegura que se trata simplemente de imperialismo burocrático.

¿QUÉ NOS DEPARA EL FUTURO?

En estos momentos numerosos artistas y realizadores de espectáculos luminosos consideran que su mayor problema lo constituye la excesiva burocracia de la BRH. Sin embargo existe otro problema que nada tiene que ver con las normas ni con la seguridad: la tecnología de los láseres artísticos ha quedado estancada.

«No se vislumbra ningún nuevo descubrimiento tecnológico», ha declarado Lowell Cross. Cualquier innovación dependerá de la creatividad de los propios artistas, teniendo en cuenta que la gama tecnológica a su disposición es muy limitada. Según Cross, una de las consecuencias es la de que todos los espectáculos láser «tiendan a parecerse. Cuando uno se ha repuesto del asombro inicial, la mayoría de los efectos son similares». Está convencido de que lo que verdaderamente les interesa a los espectadores es el propio láser y su manipulación durante el espectáculo. Muchos de los que organizan dichas veladas comparten su opinión y procuran por todos los medios que la palabra *láser* aparezca en el título. *Lovelight* parece haber sido prácticamente el único en evitarlo, pero en su nueva versión, y a pesar de la oposición de muchos de sus empleados, se ha decidido titularlo *Láser Magic*.

El propio Cross examina otras posibilidades. Jamás le ha gustado usar rock en los espectáculos láser, debido quizás a que se trata de un género musical que no le atrae. En la actualidad realiza experimentos con los sistemas de control computarizados e intenta crear lo que él denomina imágenes no holográficas «seudo-tridimensionales» que crearían una ilusión visual de profundidad realmente no existente. Experimenta también con la formación de letras y dibujos, procurando especialmente que aparezcan libres de distorsiones.

HERRAMIENTAS PARA ARTISTAS Y RESTAURADORES DE OBRAS DE ARTE

En el capítulo octavo hemos hablado del uso del láser para trabajar con ciertos materiales. Esta es una aplicación de la que también se aprovechan algunos artistas, a pesar de que suelen utilizar términos como esculpir, tallar o grabar, para la cual los láseres pueden ser utilizados y en algunos casos lo han sido. Sin embargo los instrumentos necesarios para realizar dichas tareas son sumamente caros y son pocos los artistas que puedan permitirse adquirirlos, suponiendo que estén dispuestos a prescindir de la «sensación» de crear con sus propias manos. No obstante con los láseres se puede tallar la madera o el plástico para producir objetos en serie, puesto que son capaces de repetir complejos diseños con gran rapidez y facilidad.

Probablemente el uso artístico del láser que mayor fascinación encierra es la restauración de obras de arte. Esta es una labor en la que gran parte del trabajo consiste en eliminar ciertos materiales, como polvo, pintura oxidada y otros elementos, antes de comenzar la restauración propiamente dicha. Realizar dicha tarea por medios mecánicos o químicos es algo sumamente penoso y que además puede perjudicar gravemente ciertas obras de gran fragilidad.

Un físico de la universidad de California en San Diego ha perfeccionado una técnica que implica la utilización del láser. Con las pulsaciones de un láser de rubí o de neodimio ha logrado eliminar unas incrustaciones negras que aceleraban la descomposición de unas esculturas venecianas de mármol que datan del Renacimiento. También ha utilizado la misma técnica para extraer goma dura y enmohecida del reverso de algunos cuadros, excrecencias de libros encuadernados en cuero y manchas de ciertas hojas de plata utilizadas en productos textiles. Últimamente John F. Asmus — que así es como se llama el físico en cuestión— ha logrado restaurar unas pinturas de 2.500 años de antigüedad del arte rupestre norteamericano.

LA ATRACCIÓN DEL VIDEODISCO

Los láseres juegan un papel de gran importancia en una de las aventuras más fascinantes de la tecnología del ocio que se impone hoy: el re-

productor de discos de video. Si creemos en lo que aseguran sus promotores, dichos aparatos revolucionarán este campo en la presente década. No obstante, los cínicos lo comparan una vez más con el oro de los alquimistas, condenado a caer en el olvido al igual que el sonido cuadrafónico. Parece que unos y otros están en lo cierto.

La idea fundamental es sencilla: el videodisco es el equivalente en video al disco fonográfico; con el uno se reproduce música y con el otro un programa visual a través del receptor de televisión. La meta consiste en diseñar un aparato que se pueda manejar con la misma facilidad que el fonógrafo y fabricarlo en serie.

Si bien la idea es sencilla, no ocurre otro tanto con la tecnología. En el caso del fonógrafo se desplaza una aguja por el interior de un surco espiral grabado en el disco y su movimiento mecánico reproduce el sonido registrado en él. Este sistema es perfectamente adecuado para la música, donde la frecuencia máxima es de unos 20 Hertz. Pero para reproducir imágenes visuales a todo color es preciso cubrir frecuencias de hasta 6,3 millones de Hertz, lo que resulta imposible con una aguja de fonógrafo.

Los técnicos que han estudiado el problema han sugerido diversas soluciones que, en su mayoría (como la de grabar hologramas en una cinta especial), han resultado un fracaso. Sin embargo, después de muchos años de investigación, se ha comprobado que es posible sustituir la aguja por el haz de luz de un láser de helio-neón y el surco por una figura espiral de puntos de reflexión. La solución es eminentemente nítida. Al eliminar el contacto mecánico entre el disco y la «aguja» se evita también el desgaste. Además, debería ser posible, por lo menos en teoría, grabar la información deseada de forma que ni las huellas ni los rasguños afectasen su reproducción. Debido a que el haz de luz de un láser puede focalizarse extraordinariamente, los puntos podrían ser pequeñísimos y por consiguiente podría grabarse hasta una hora de programación en un solo disco.

Dicha técnica ha sido perfeccionada independientemente por la casa Philips, la gigantesca empresa electrónica holandesa, y MCA Inc., productores cinematográficos estadounidenses. En la actualidad ambas empresas han decidido coordinar sus esfuerzos y Philips fabrica los aparatos a través de una compañía subsidiaria denominada Magnavox en Estados Unidos, mientras que MCA produce los discos después de haberse asegu-

rado los derechos de distribución de películas y otros temas. Entre las varias empresas que se han asociado con Philips y MCA figuran la IBM (copropietaria de Disco Vision) y la compañía japonesa Pioneer Electronics (que fabrica sus propios aparatos de reproducción).

El atractivo que tiene el láser para el público no les ha pasado desapercibido a los fabricantes. Pioneer, por ejemplo, denomina su sistema «Laserdisc». Por otra parte, en algunos almacenes exhiben los videodiscos aprovechando el hecho de que la alta densidad de sus puntitos crea una atractiva reflexión multicolor.

Sin embargo se ha descubierto que los reproductores de videodiscos no precisan ningún láser. La RCA ha perfeccionado un modelo que utiliza un sensor electrónico y la empresa japonesa Matsushita ha creado otro sistema parecido, si bien los discos de un sistema son incompatibles con los del otro. En el momento de escribir estas líneas la RCA acaba de lanzar su sistema al mercado y la Matsushita espera hacerlo en 1982. La guerra ha sido declarada y cada empresa cuenta con sus respectivos aliados comerciales dispuestos a fabricar aparatos y accesorios sólo compatibles con ellos.

Hoy parece que los principales contendientes serán la RCA por una parte y el grupo MCA/Philips por la otra. Cada sistema ofrece sus ventajas. A unos 500 dólares, el aparato fabricado por la RCA es de 200 a 300 dólares más barato que cualquiera de los reproductores dotados de láser y el precio de los discos es también ligeramente inferior. La RCA cuenta además con una inmensa red de distribución que incluye la cadena Sears Roebuck. Pero los aparatos con láser ofrecen posibilidades más amplias y han sido los primeros en ser lanzados al mercado. Ambos grupos han invertido enormes sumas de dinero en sus respectivos proyectos. Se calcula que la inversión de la RCA es del orden de los 150 millones de dólares y aun cuando se supone que la cifra del grupo MCA/Philips no es por el momento tan elevada, la diferencia es probablemente despreciable.

A finales de 1980, tanto Philips como RCA preveían las mejores ventas, algo perfectamente comprensible dada la importancia de sus inversiones. El presidente de Philips decía que confiaban en vender «cientos de millares» de aparatos en Estados Unidos en 1981, mientras que portavoces de RCA pronosticaban que sus ventas durante el mismo período alcanzarían las 200.000 unidades, además de unos dos millones de dis-

cos, y llegaron incluso a vaticinar que en 1990 la venta de aparatos sería de cinco a seis millones anuales y la de discos de 200 a 500 millones.

Los resultados hasta estos momentos no justifican su optimismo. Los aparatos fabricados por Magnavox hicieron su aparición en diciembre de 1978 en Atlanta y el público los recibió inicialmente con entusiasmo; pero dos comerciantes de dicha ciudad han asegurado que las ventas decrecieron enormemente durante los dos años siguientes. En unos grandes almacenes llamados Rich's sólo vendieron dos aparatos durante la temporada navideña de 1980 y uno de sus vendedores nos confesó que algunos clientes los devolvían decepcionados por la escasez de programas. Otro comerciante afirmó que en 1980, vendió un solo aparato durante un mes, lo que representaba un mínimo porcentaje de lo vendido en años anteriores. No existen cifras oficiales que reflejen las ventas actuales, pero no cabe duda de que son muy inferiores a las previstas. Philips ha almacenado cantidades inusitadas de láseres de helio-neón destinados a sus aparatos e incluso ha fundado su propia fábrica, puesto que la cantidad prevista era superior a la totalidad de la producción global del mundo occidental (unos 150.000 láseres anuales). Pero a principios de 1981 Philips ya había comenzado a vender discretamente a otras empresas algunos de los láseres producidos inicialmente para sus videodiscos.

El único problema no radica en la lentitud de las ventas. Muchos discos han resultado defectuosos y han aparecido ciertos problemas con los propios aparatos, agravados por la escasez de técnicos capaces de repararlos. Incluso los comerciantes están decepcionados. Después de desplazarse tres veces hasta un taller situado a 30 kilómetros, los propietarios de una tienda de Boston acabaron por arrinconar su modelo de muestra. Cuando nos aventuramos a entrar en el local para preguntar sobre el aparato en cuestión nos comunicaron que no funcionaba y nos advirtieron «ya saben ustedes que no sirve para grabar».

RCA por otra parte asegura que se vendieron 26 000 videodiscos durante las primeras cinco semanas a partir de su lanzamiento, lo que según ellos representa «el mayor éxito de la historia en la introducción de un producto electrónico de alta calidad». La opinión de los detallistas, que no han dejado de quejarse de la lentitud de las ventas es distinta, claro. Incluso parece ser que algunos de ellos los ofrecen al público al precio de coste, pero no se sabe aún si los aparatos de la RCA adolecen de algún problema técnico. Aunque es preciso reconocer que la política de ventas

de la RCA es algo deficiente, sobre todo cuando intentan promocionar videodiscos de recitales musicales con sonido monofónico (los aparatos RCA no pueden reproducir, por el momento, el sonido estereofónico).

En el mejor de los casos, los reproductores de videodiscos láser serán difícilmente rentables. No sólo se ven obligados a competir con RCA y Matsushita, sino que los grabadores magnéticos, los múltiples servicios de televisión por cable, las transmisiones directas de los satélites y los servicios de bibliotecas visuales tales como la Home Box Office. El láser ha aportado la tecnología necesaria para revolucionar el mundo de la diversión en el interior de nuestros propios hogares, pero todavía no está claro cual será el sistema práctico que acabe por imponerse.

EFECTOS SECUNDARIOS DEL VIDEODISCO

La tecnología perfeccionada para la producción de reproductores de videodiscos no desaparecerá aunque lo hagan los propios aparatos, y algunos de sus atributos, como el de detener la acción en un momento dado, resultan particularmente atractivos en el campo pedagógico. La General Motors, por ejemplo ha adquirido unos 10.000 aparatos especiales (una clara demostración de prestigio) para la formación y uso de sus agentes. Por el momento parece ser que no han sido utilizados todavía de un modo extensivo (a pesar de que durante la crisis de 1980 muchos vendedores combatieron el aburrimiento gracias a los receptores de televisión que llevaban los equipos). Pero las perspectivas de dicha tecnología cara a la enseñanza parecen bastante prometedoras, en particular para la instrucción del personal en nuevas tareas cuando sea necesario repetir la misma información en distintos lugares.

Un montaje similar al de los gramófonos automáticos podría constituir la base de una biblioteca visual, a la que tendrían acceso los usuarios de alguna red de televisión por cable de fibra óptica como las descritas en el capítulo sexto. Otra posibilidad consistiría en distribuir programas visuales grabados en discos a las centrales locales de los servicios de televisión por cable, en lugar de transmitirlos por satélite. Esto podría suponer una enorme ventaja puesto que las transmisiones de los satélites pueden ser fácilmente interceptadas sin autorización, gracias a la creciente cantidad de equipos electrónicos que aparece en el mercado.

Philips ha adoptado también la tecnología del videodisco a un disco de audio de altísima fidelidad. El reproductor utiliza un pequeño láser de semiconductor —en lugar del de helio-neón— para la reproducción de discos de reducido tamaño. Gracias a que la grabación se realiza por el procedimiento digital, en lugar del analógico, su reproducción es mucho más nítida. En el momento de escribir estas líneas, el disco digital reducido parece estar a punto de convertirse en el modelo de aceptación general para grabaciones sonoras, a pesar de que es difícil prever la fecha de su lanzamiento o su popularidad inicial debido a que es incompatible con los discos actuales.

La misma tecnología que permite grabar información visual o sonora en forma altamente concentrada sirve también para conservar datos digitales para las computadoras, tal como se ha descrito brevemente en el capítulo 11. Por consiguiente todo parece indicar que el perfeccionamiento de la tecnología de los videodiscos láser causará cierto impacto, aunque quizá no se manifieste en los aparatos de televisión domésticos para los que había sido inicialmente concebida.

14. MAÑANA O PASADO MAÑANA: OTRAS FRONTERAS DEL LÁSER

Hemos mencionado numerosas posibilidades de aplicación para los láseres que no han llegado todavía a materializarse plenamente, desde los modelos de alta potencia con los que experimentan los militares hasta los de baja potencia que se utilizan en las comunicaciones por fibra óptica. Aunque con eso no hemos agotado sus posibilidades. En realidad, al acercarnos al fin de este libro sentimos ciertos remordimientos por todo cuanto no hemos incluido en él y hemos creído conveniente esbozar en este capítulo otras fronteras que la tecnología láser quizás alcance algún día. No nos sorprendamos si dentro de unos años comprobamos que nos hemos olvidado algo. Nosotros seríamos los primeros en sentirnos decepcionados si los científicos no descubriesen otras posibilidades en las que hoy ni siquiera sueña nadie.

LA INGENIERÍA GENÉTICA

El progreso de la investigación genética se ve entorpecido por la tremenda dificultad en conseguir que ciertos genes específicos cambien en un momento dado. El problema estriba fundamentalmente en que, si bien los genes son diminutos y sumamente frágiles, las herramientas utilizadas por los genetistas son toscas y excesivamente contundentes. Es algo parecido a intentar reparar un reloj de pulsera con un martillo pilón. El progreso realizado con tan basto instrumental supone un gran mérito para ellos y un tributo a su ingenio. Uno de los métodos que utilizan consiste en recurrir a productos químicos que producen mutaciones aleatorias (cambios en los genes) en un gran número de células y a continuación separan cuidadosamente dichas células hasta descubrir el cambio deseado. El procedimiento en cuestión recibe el nombre de «perdigonada» y, si se practica cuidadosamente, no es tan absurdo como buscar una aguja en un pajar, ya que en este caso la «aguja» crece. Pero es sumamente penoso.

A los genetistas les encantaría disponer de algún mecanismo con el que pudiesen causar ciertos cambios específicos en puntos determinados de una molécula de DNA y, para ello, el láser podría ser la solución deseada. A primera vista podría parecer que la forma más apropiada sería focalizar el haz de luz sobre un pequeño punto de una molécula de DNA. Por desgracia esto es imposible, porque el diámetro de dicho punto tendría que ser aproximadamente de una millonésima de milímetro y todavía no existe ningún láser cuya longitud de onda se lo permita. No es posible focalizar la luz en un punto de diámetro significativamente inferior al de su longitud de onda y una millonésima de milímetro equivaldría a una longitud de onda que sería unas 500 veces inferior a la de la luz visible.

Otro método podría ser el que presentó M. I. Stockmann en el Instituto soviético de automatización y electrometría, de Novosibirsk. En primer lugar utilizó un colorante que se adhirió a ciertas partes específicas de la molécula de DNA y a continuación la sometió a las pulsaciones ultravioleta de un láser de nitrógeno. El colorante absorbió la luz y transmitió suficiente energía al DNA para romper la cadena genética en un punto determinado. No obstante a dicha técnica le falta todavía mucho camino por recorrer antes de que se pueda aplicar en la práctica.

Hay también biólogos que se sirven de láseres para estudiar los detalles de la fotosíntesis, es decir el proceso a través del cual las plantas utilizan la luz solar para elaborar hidratos de carbono. La fotosíntesis es tan rápida que se mide en picosegundos (billonésimas de segundo), pero la velocidad del láser permite percibir su proceso. La idea básica consiste en dirigir una pulsación de un picosegundo de duración al aparato fotosintético de la célula y comprobar el resultado. En la práctica dicha operación es sumamente compleja debido a la precisión necesaria para medir fracciones de tiempo tan minúsculas. El objetivo es el de llegar a comprender los misteriosos procesos que tienen lugar y quizás algún día llegar a repetirlos e incluso mejorarlos.

ONDAS DE GRAVEDAD

Las ondas de gravedad son diminutas oscilaciones (jamás detectadas) que según se cree se propagan por todo cuando existe en el espacio y en

el tiempo a la velocidad de la luz. Albert Einstein pronosticó su existencia en 1920, pero hasta 1960 no empezó Joseph Weber, de la universidad de Maryland (el mismo que cuando estudiaba en la universidad de Columbia colaboró con Charles Townes en la construcción del primer máser) una serie de experimentos destinados a detectarlas. Para ello construyó una enorme barra metálica y a continuación intentó detectar las diminutas distorsiones que en teoría deberían causar dichas ondas. Otros científicos han emprendido experimentos similares, aunque por el momento no se sabe que hayan tenido éxito.

Debido a que los detectores de barras metálicas han demostrado no ser lo suficientemente sensibles, los físicos intentan descubrir algún nuevo tipo de detector de ondas de gravedad. Una posibilidad que es objeto de estudio por parte de varios grupos es la de servirse de una manera muy simple de láseres. Esencialmente, la idea consiste en suspender dos enormes y pesados espejos en cámaras de vacío, dejando entre ellas una distancia de varios kilómetros. En teoría, la radiación gravitacional debería perturbar los espejos provocando un movimiento relativo entre ellos. A pesar de la enorme distancia que los separaría, dicho movimiento probablemente iba a ser diminuto, quizás incluso menor que la longitud de onda de la luz, lo que no impediría que se pudiese medir por medio de la interferometría láser, como se ha descrito en el capítulo noveno. En realidad, el uso de avanzadas técnicas de procesamiento de señales le permitieron a Robert L. Forward medir desplazamientos periódicos de tan sólo 9×10^{16} m (aproximadamente el diámetro de un protón) durante unos experimentos realizados en 1972 con un sistema de barra de detección de ondas de gravedad de 8,5 m de longitud en los laboratorios de investigación Hughes, de Malibu, California. El calificativo *periódicos* —es decir de desplazamiento que tienen lugar a intervalos regulares— es importante debido a que dicho movimiento puede ser detectado con mayor facilidad que el que ocurre en intervalos aleatorios.

A pesar de que la interferometría láser pueda parecer muy avanzada, podría quedar ampliamente superada por un método que estudia un grupo de científicos del Instituto soviético de termofísica en Novosibirsk. S. N. Bagayev, V.G. Goldort,. A.S. Dychkov y V.P. Chebotayev han alcanzado una exquisita sensibilidad al llegar a observar el movimiento de los espejos que componen el resonador de un modelo de láser muy especial, cuya característica principal es la de haber sido estabilizado para que

emita en una sola longitud de onda precisa y definida. Cualquier diminuto movimiento en uno de los espejos modifica la longitud de la cavidad láser y por consiguiente la de la longitud de onda de salida. La variación de la longitud de onda provoca a su vez un cambio detectable en la intensidad de salida del láser. Hasta estos momentos los rusos no han logrado encontrar las ondas de gravedad, pero han detectado movimientos periódicos de hasta $6\times10^{'16}$ m, es decir que han igualado los mejores resultados de la interferometría láser.

Todavía queda mucho camino por recorrer. El mayor interferómetro del mundo para detectar ondas de gravedad es el de 10 m de longitud que se construye actualmente en la universidad de Glasgow, pero los científicos creen que para tener éxito será preciso disponer de uno de varios kilómetros de longitud. Los rusos apenas han comenzado a experimentar con su nuevo método. Existe también otro problema. Cualquier instrumento suficientemente sensible para detectar ondas de gravedad registraría también los movimientos sísmicos, incluso los producidos por el paso de camiones, por lo que los físicos tendrán que descubrir algún sistema para aislar sus aparatos de las vibraciones indeseadas que podrían ofuscar las de las ondas que intentan detectar. No obstante, los investigadores parecen estar convencidos de que los sistemas de calibración altamente sensibles basados en el láser permitirán algún día verificar la predicción de Einstein que cuenta ya con más de sesenta años.

DEMOSTRACIÓN DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Se ha utilizado un láser cuidadosamente estabilizado —similar al usado por los rusos en sus experimentos de ondas de gravedad— para poner a prueba uno de los puntales fundamentales de la física moderna: la suposición de Einstein de que la velocidad de la luz es constante, sea cual sea la dirección en que se desplace a través del espacio, condición esencial de su teoría de la relatividad especial. En el Joint Institute for Laboratory Astrophysics de Boulder, Colorado, bajo la responsabilidad conjunta del National Bureau of Standards y la universidad de Colorado, A. Brillet y John L. Hall han realizado ciertos experimentos destinados al mismo fin que los ya famosos de Michelson-Morley, que demostraron por primera vez que la velocidad de la luz es constante. Los experimen-

tos de Brillet y Hall estuvieron dotados de una sensibilidad exquisita, logrando demostrar que la máxima variación en la velocidad de la luz no puede superar uno entre 10^{15} (una mil billonésima). Éstos han sido los resultados de mayor precisión obtenidos hasta estos momentos como verificación de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

Es, asimismo, posible que los láseres ultraestables nos permitan definir la longitud por medio del tiempo. La idea, en síntesis, consistiría en determinar el valor de la velocidad de la luz, es decir, definirla atribuyéndole un número determinado, y a continuación definir el metro patrón como la distancia recorrida por ella en cierta fracción de segundo. (Todas las demás unidades de longitud se definen a partir del metro patrón.) Dicha definición no importaría sólo a los teóricos. Según un físico del National Bureau of Standards, de Boulder, llamado Kenneth M. Evenson, el hecho de definir el metro por medio de la velocidad de la luz significaría que en lugar de utilizar la longitud de onda de la luz de una lámpara especial para definirlo, como se hace en la actualidad, los físicos podrían servirse de cualquier láser que fuese lo suficientemente estable. Otros comparten su opinión; y, en 1981, la Junta consultiva internacional para la definición del metro recomendó que se definiese la velocidad de la luz atribuyéndole cierto valor y que se definiese el metro patrón con relación a la velocidad de la luz. Por el momento ninguna organización internacional ha cumplido todavía dicha recomendación.

SUPERREFRIGERANTES

Los físicos han conseguido poner a punto otras técnicas láser bastante exóticas y, entre ellas, una que permite refrigerar los átomos o las moléculas hasta una fracción de grado del cero absoluto, es decir la temperatura a la cual se detendría (por lo menos en teoría) todo movimiento. La idea, en esencia, consiste en sintonizar un láser en una longitud de onda muy cercana (ligeramente superior) a la que normalmente absorberían los átomos o las moléculas que se estudien y someterlos simplemente a ella. El movimiento natural de los átomos o moléculas hará que su longitud de onda de absorción se desplace hasta llegar al punto en que absorban la luz del láser, luz que será remitida. Cada vez que un átomo o una molécula absorbe y reemite luz, pierde una pequeña cantidad de energía, sufi-

ciente para experimentar un pequeño descenso en la temperatura. Si la luz del láser es lo suficientemente intensa, cada átomo o molécula seguirá absorbiendo y reemitiendo luz, con el consiguiente descenso de su temperatura en cada ocasión. Por el momento los físicos han logrado utilizar ya esta técnica para refrigerar unos pocos átomos hasta acercar su temperatura a sólo una fracción de grado del cero absoluto. Para los científicos es sumamente interesante poder refrigerar los átomos, puesto que a tan baja temperatura se simplifica su normalmente compleja estructura interna, gracias a lo cual pueden estudiarlos con mayor facilidad.

FOTOQUÍMICA

A pesar de que quedan todavía muchas barreras por superar, es posible que algún día se generalice el uso de los láseres para sintetizar compuestos químicos. Los fotones procedentes del láser excitarían los átomos o las moléculas hasta estados en los que reaccionarían ávidamente con otros átomos o moléculas. También es posible que los fotones del láser rompan las moléculas o liberen electrones de los átomos, en lugar de hacer que reaccionen directamente con otros átomos o moléculas.

La idea de servirse de la luz para provocar reacciones químicas no es ninguna novedad. La luz solar provoca numerosas reacciones, desde un bronceado a la fotosíntesis. La fotografía convencional está también basada en reacciones fotoquímicas: la disociación de las moléculas de cloruro de plata provocada por los fotones produce plata metálica (la parte oscura de los negativos fotográficos).

La diferencia, en las reacciones químicas inducidas por láser, estriba en su precisión. Hemos aclarado anteriormente que cada átomo y molécula absorbe luz de unas longitudes de onda características. Con el fin de excitar un átomo o una molécula es preciso que la longitud de onda de la luz emitida por el láser corresponda a una de las de absorción del átomo o molécula en cuestión. Sin embargo, provocar una reacción química no es tan simple como parece. Es preciso asegurarse también de que la luz proporcione la energía suficiente al átomo o a la molécula para desencadenar dicha reacción. Es preciso asegurarse también de que la luz de la longitud de onda utilizada no sea absorbida por otros materiales que no sean los deseados. Y finalmente es necesario disponer de algún método

para extraer los átomos o moléculas producidos por las reacciones químicas.

Por el momento la mayor parte de la investigación fotoquímica láser ha sido canalizada hacia el problema que hemos comentado en el capítulo décimo, es decir, el enriquecimiento de uranio-235 a un nivel superior al 0,7 por ciento característico del uranio natural. Las dificultades son muy considerables, debido a que las propiedades químicas del uranio-235 son prácticamente idénticas a las del uranio-238 común. Sin embargo las dificultades de las técnicas convencionales de enriquecimiento son de tal magnitud —como se ha destacado anteriormente— que el Departamento de Energía norteamericano ha decidido mantener un extenso programa basado en la utilización de láseres.

A pesar de que muchos de los detalles relacionados con el enriquecimiento del uranio se guardan en secreto, se han llevado también a cabo amplias investigaciones sobre el enriquecimiento de isótopos de otros elementos, como hidrógeno, cloro, oxígeno, carbono, azufre y osmio. Además, otros investigadores se han dedicado a estudiar las propiedades más generales de la fotoquímica láser y los científicos han comenzado a comprender las condiciones necesarias para que la química inducida por láser pueda llegar a convertirse en una realidad práctica a gran escala. Los resultados son bastante alentadores.

Lo interesante es haber demostrado que los láseres son realmente capaces de producir reacciones químicas en muchos tipos de materiales. Las muestras van desde lo más sencillo a lo más intrincado. Ciertos investigadores del laboratorio nacional de Los Alamos se han servido de un láser para encender una lámpara de alcohol, de la misma manera que para eliminar ciertas impurezas de los materiales utilizados para la construcción de semiconductores electrónicos.

La mayor desventaja de las técnicas láser reside en su precio que, por lo general, es demasiado elevado para competir con las alternativas convencionales, debido en gran parte a la relativa ineficacia del láser que encarece el coste de sus fotones. El problema no tiene gran importancia cuando de lo que se trata es de inducir una reacción química con un grupo reducido de átomos o moléculas, como en el caso de la eliminación de impurezas de los materiales semiconductores, pero adquiere unas dimensiones colosales cuando el propósito consiste en excitar prácticamente todas las moléculas de alguna mezcla.

Otra complicación estriba en que con excesiva frecuencia no se dispone del láser adecuado para satisfacer las necesidades de algún proyecto determinado. El más notable de dichos problemas ha sido la búsqueda de un láser que emita luz en una longitud de onda de 16 micrómetros en la gama infrarroja, que, por lo menos en teoría, sería absorbida fuertemente por el hexafluoruro de uranio y permitiría su enriquecimiento isotópico. Muchos investigadores haciendo gala de su característica ingeniosidad han presentado una serie de extraños aparatos que emiten en la gama adecuada, pero que en su mayoría son de escasa eficacia y de difícil manipulación. Ninguno de ellos posee, ni siquiera remotamente, la eficacia y simplicidad del láser de dióxido de carbono que emite en una longitud de 10 micrómetros. Fue precisamente la coincidencia de que la luz de dicha longitud fuese fuertemente absorbida por el hexafluoruro de azufre, cuyas moléculas son bastante parecidas a las del hexafluoruro de uranio, lo que despertó inicialmente gran parte del interés en el enriquecimiento del uranio. Quizá debamos considerarnos afortunados por el hecho de que no se haya logrado construir ningún láser de 16 micrómetros, puesto que no está claro que lo que el mundo necesita sea un sistema eficaz y barato para el enriquecimiento del uranio-235, que en la práctica eliminaría el mayor impedimento existente en la actualidad para la fabricación de bombas atómicas.

Algunos de los problemas mencionados se solucionarán a largo plazo. Es altamente improbable que el uso de los láseres llegue a generalizarse en las plantas químicas, aunque seguramente se seguirán utilizando para eliminar pequeñas concentraciones de impurezas nocivas, como en el caso del material destinado a la fabricación de semiconductores. También es posible que sean útiles para la extracción de isótopos radiactivos de los residuos con un bajo nivel de radiactividad, reduciendo de ese modo el volumen de los desechos peligrosos al concentrar los elementos radiactivos.

LA ÓPTICA INTEGRADA

Una tecnología algo más futurista es la óptica integrada. En la actualidad los circuitos electrónicos integrados realizan muchas de las funciones que anteriormente llevaban a cabo diferentes componentes, como

resistencias y condensadores. Lo que los investigadores persiguen es la integración de componentes ópticos en un solo bloque de material, a semejanza de lo que ocurre en la electrónica. La óptica se utilizaría primordialmente para procesar señales (ópticas) y quizá también para algunas funciones de computación más fáciles para la óptica que para la electrónica.

A los militares les gustaría utilizar la óptica integrada para analizar señales de radar y para simplificar la computación óptica en los satélites, proyectiles y aviones.

Otro campo en el que sus posibilidades serían todavía mayores es el de las comunicaciones por fibra óptica, que avanza a pasos agigantados. En la actualidad, las señales ópticas han de ser convertidas en electrónicas antes de ser amplificadas, modificadas o procesadas y, a continuación, deben ser convertidas una vez más en señales ópticas para ser transmitidas por fibra óptica. Evidentemente, se simplificaría en gran manera la operación si se pudiesen evitar dichas conversiones. Los diseñadores de fibras ópticas confían en que algún día la totalidad de sus redes operará por procedimientos ópticos, pero en estos momentos su deseo es un mero sueño.

LA PROPULSIÓN LÁSER

En el extremo opuesto de la escala de posibilidades se alberga un sueño todavía más remoto: la propulsión de naves espaciales y aéreas por medio del láser. Si la idea les parece descabellada, consuélense pensando que no son los únicos. El concepto ha asombrado también a numerosos físicos e ingenieros. Sin embargo, cuando se acepta la posibilidad de que lleguen a existir láseres con la potencia suficiente —quizás a raíz del perfeccionamiento de los láseres bélicos—, la idea de propulsión comienza a parecer, sino fácil, por lo menos digna de ser tenida en cuenta.

En la actualidad se estudian dos sistemas de propulsión diferentes para cohetes y aviones, en los que el láser no se encontraría a bordo de la nave, sino en tierra o en un satélite. En un cohete se dirigiría el haz de luz a su cola para calentar algún tipo de combustible que, al volatilizarse a una velocidad extremadamente elevada y expulsar los gases por su parte inferior, los propulsara hacia arriba como ocurre en los actuales cohetes.

Como posible combustible se está estudiando el hidrógeno (debido a su poco peso), el argón (por ser un gas inerte y abundante) y el agua (debido también a su abundancia y al hecho de que se puede congelar).

En el caso de los aviones, el láser no calentaría propiamente el combustible, sino el aire del interior del motor a propulsión que, a su vez, haría girar la turbina propulsora.

Ambos sistemas utilizarían láseres que se diferenciarían enormemente entre sí. Abraham Hertzberg, de la universidad de Washington, en Seattle, y K.C. Sun, del laboratorio de investigación de la Lockheed, en Palo Alto, han calculado que un satélite activado por energía solar que contuviese un láser capaz de emitir continuamente 40 millones de vatios podría proporcionar la energía necesaria para un aeroplano. El haz de luz se dirigiría (quizá por medio de otro satélite repetidor) a la parte superior del avión cuando volase a su altura normal de crucero. Para ganar esa altura, o para aterrizar, utilizaría combustible convencional (queroseno).

La potencia necesaria para lograr que despegase un proyectil sería diez veces superior, y podría llegar a ser de cien veces cuando la carga fuese abundante. Los que hayan presenciado algún lanzamiento comprenderán perfectamente que se precisa una enorme cantidad de energía con el fin de generar la aceleración necesaria para lograr que despegue el cohete. En la práctica, probablemente se instalarían los láseres de lanzamiento sobre alguna montaña, no con el fin de ganar algunos kilómetros de altura, sino para poder operar en las zonas más altas de la atmósfera. Como hemos visto anteriormente, los fenómenos atmosféricos pueden dificultar enormemente la manipulación del láser, y se considera que es de suma importancia poder focalizar prácticamente la totalidad de su energía en las toberas del cohete. Pero el problema no es tan serio como el de los láseres bélicos, ya que en este caso se trataría de un blanco «solidario» que cooperaría para que el haz de luz se mantuviera focalizado.

Los investigadores de la NASA han llegado a la conclusión de que no se utilizaría el sistema de propulsión láser en un futuro próximo debido a la enorme potencia que sería necesaria. Sin embargo se podría utilizar para alterar la órbita de los vehículos espaciales, lo que adquirirá una enorme importancia cuando los transbordadores espaciales coloquen regularmente vehículos en órbitas terrestres de poca altura. Se calcula que la cantidad de combustible necesaria para propulsar un cohete por medio de un láser sería aproximadamente el 10 por ciento de la requerida

en la propulsión química, y ya que poner el combustible en órbita supone un elevado coste, la reducción de peso representaría un ahorro muy considerable, incluso a pesar del enorme precio del láser que sería necesario construir. Para operar en el espacio se necesitarían varias decenas de megavatios (mucho menos que desde la tierra) y al mismo tiempo se evitarían los efectos atmosféricos que podrían causar innumerables problemas en un sistema de base terrestre.

Todas estas propuestas dependen de que logremos construir grandes láseres. Un láser de 40 millones de vatios con la potencia suficiente para transferir la energía necesaria a un aeroplano o alterar la órbita de los satélites sería casi diez veces más potente que las armas espaciales de la primera generación propuestas por el senador Wallop. Al contrario que las armas, los láseres de propulsión tendrían que operar continuamente o producir pulsaciones sumamente rápidas a lo largo de muchas horas. Un láser de base terrestre cuya función fuese la de propulsar un cohete debería suministrar unos mil millones de vatios durante un período de más de 30 minutos. La construcción de dichos láseres probablemente no es imposible, pero fácil seguro que no.

¿Por qué se interesan entonces, tanto la NASA como el Departamento de defensa, en la propulsión láser? Porque, en teoría, podría llegar a ser menos costosa y más nítida que las técnicas utilizadas en la actualidad. Además, parece ser que proporcionaría una mayor aceleración en el espacio que los demás sistemas de propulsión de alta eficacia, como los iónicos o los eléctricos.

Hertzberg y Sun han realizado ciertos cálculos que favorecen la idea de los aviones propulsados por láser. Uno de sus modelos propuestos sólo necesitaría 4.800 kg de queroseno para realizar un vuelo transatlántico de 5.500 km, mientras que un avión convencional diseñado para el mayor ahorro de combustible necesita 29.500 kg para realizar el mismo recorrido. La inversión requerida sería de gran magnitud: unos 100 millones de dólares para cada uno de los 300 satélites de energía solar necesarios y unos cincuenta millones de dólares para cada uno de los 400 satélites de repetición también imprescindibles. Ya en 1978 Hertzberg y Sun habían llegado a la conclusión de que el sistema que proponían no sería más caro que el convencional si el precio del combustible llegaba a 0,30 dólares por litro, que seguramente habrá sido ya superado cuando

lean estas líneas. Además la energía procedería del sol y no de nuestras decrecientes reservas petrolíferas.

También se prevén espectaculares economías en los cohetes propulsados por láser. Arthur Kantrowitz, que fue el primero en sugerir la idea hace más de una década cuando era director de los laboratorios de investigación de Avco Everett, de Massachusetts, asegura que el coste del lanzamiento de satélites sería de 40 dólares por kg, en vez de los 2.000 dólares de un cohete convencional, o de los mil de la «lanzadera espacial». Estudios realizados en la Lockheed confirman que sería mucho más barato utilizar cohetes de láser para los cambios de órbitas que los de propulsión química.

La economía no es lo único que importa. Los partidarios del intenso desarrollo espacial cierran voluntariamente los ojos ante los problemas de la contaminación creada por los actuales cohetes de propulsión química, debido a que cierto control de dicha contaminación podría limitar el número de lanzamientos autorizados. Los cohetes propulsados por láser podrían utilizar combustibles no contaminantes, como agua o argón, y eliminar completamente la dificultad. (El único problema podría provenir de los láseres instalados en la Tierra, que quizás emitiesen algún tipo de contaminante químico.) Kantrowitz ha hablado de un sistema láser que permitiría lanzamientos de una tonelada con intervalos de pocos minutos y que, al año, lograría colocar 100.000 toneladas de carga en el espacio.

Algunos físicos no han salido todavía de su asombro ante el hecho de que haya quien crea realmente en la propulsión láser y no les falta razón para ello.

Lo que se propone está muy por encima de las posibilidades actuales. No obstante, ideas dotadas de tanta intrepidez son, precisamente, las que pueden constituir un estímulo importante para la imaginación tecnológica, aunque no lleguen a materializarse en la forma en que hayan sido concebidas.

CONVERSACIONES CON OTROS MUNDOS

Existen sueños todavía más exóticos que el de la propulsión láser, como el de establecer comunicaciones interestelares, por ejemplo.

Las fotografías de planetas lejanos las transmiten a la Tierra las naves espaciales, como el Voyager, a través de ondas de radio o microondas. Edward C. Posner, del Instituto de tecnología de California, ha creado un plan para transmitir esa información, las fotografías, por medio del láser, para cruzar enormes distancias que, probablemente, no podrían superar las ondas de radio y las microondas. Según sus cálculos, un láser con una potencia de tan sólo 500 vatios podría transmitir fotografías de otros planetas, de una calidad similar a las del Voyager, desde una distancia de seis años luz. Concretamente, le interesa explorar el sistema estelar Barnard, situado a seis años luz de la Tierra, donde se cree que existen planetas.

Los cálculos de Posner pecan quizá de optimistas. Precisan de un sistema codificado muy avanzado y no prevén que la luz de la estrella pudiera oscurecer la del láser del vehículo interestelar. Sus previsiones, pese a pecar de optimistas, ponen de relieve la aptitud del láser para las transmisiones.

En teoría, si los láseres fuesen lo suficientemente potentes y los haces de luz tuvieran el diámetro adecuado, debería ser posible transmitir señales a través de la galaxia, aunque en la práctica probablemente serían oscurecidos por la absorción del polvo interestelar. Este tipo de láseres podrían ser bombeados por la energía de las estrellas y sus señales serían focalizadas por un espejo espacial de diámetro no inferior a un kilómetro.

La construcción de los aparatos necesarios probablemente sería la parte más fácil de este proyecto de comunicaciones. Lo más difícil podría ser llegar a establecer contacto. El finísimo haz láser no sería el mejor medio para localizar otras civilizaciones; probablemente no acertaría a dar con ellas aunque existiesen. Y si se descubriese algún objetivo, no sería tampoco cosa fácil dirigir el haz de luz adecuadamente, ya que para recibir información acerca de las trayectorias que siguieran dentro de su sistema estelar tendríamos que esperar durante los 100.000 años que tardaría el haz del láser en cruzar la galaxia. (A lo largo de dicha distancia el haz diverge- ría hasta alcanzar un diámetro semejante al del sistema solar.) Este es el tipo de problema que, por comparación, hace que la construcción de un sistema de propulsión láser parezca relativamente sencillo.

OTRAS APLICACIONES FUTURAS

Otras ideas para nuevas aplicaciones futuristas del láser son más o menos similares a la de las comunicaciones interestelares. Hace algunos años, por ejemplo, un grupo de téjanos adquirieron un láser para intentar comunicarse con objetos volantes no identificados (OVNIS). El hecho de que no se haya oído hablar más de ello es de suponer que significa que no han conseguido su propósito.

Los chinos han descubierto que el cabello crece con mayor rapidez en las partes de la piel iluminadas con láser, aunque hasta estos momentos no se ha recibido información alguna que confirme que los calvos tratados por dicho método hayan dejado de serlo.

En algunas ocasiones se ha propuesto con toda seriedad el uso de láseres de alta potencia para transmitir energía desde un punto a otro de la tierra vía satélite, o desde un satélite base a otros satélites.

Y es, además, muy probable que en algún recóndito sótano de nuestro planeta alguien esté intentando servirse de un láser para establecer contacto con el mundo del más allá.

LOS PRÓXIMOS VEINTE AÑOS

Puede que durante los próximos veinte años no se materialicen más que un puñado de nuevas ideas. Algunos de los grandes proyectos de la actualidad quizá queden descartados, con anotaciones marginales que les tachen de curiosos, aunque poco prácticos. Otros estarán todavía en su etapa de desarrollo, probablemente mucho más retrasados que lo que prometían las optimistas previsiones actuales. Y unos pocos se habrán convertido en las herramientas del siglo XXI.

Para saber qué proyectos triunfarán y cuáles van a fracasar no queda otra salida que esperar. He aquí la función de la investigación y del desarrollo. No se trata de convertir todas las ideas en éxitos avasalladores, sino de ponerlas a prueba y valorar sus posibilidades, seleccionando aquellas que contribuyen a solucionar auténticos problemas a un coste más razonable que las demás. Entre los científicos con que conversamos, pocos han estado dispuestos a avanzar en condiciones precarias por no comprobar antes los resultados, y nosotros estamos totalmente de acuerdo con la mayoría.

Durante las dos últimas décadas, el láser dejó de ser una imagen de ciencia-ficción para convertirse en un instrumento práctico con multitud de aplicaciones, y lo más probable es que sigan descubriéndose otras muchas durante las dos próximas décadas.

El láser no tardará en entrar en sus vidas.

APÉNDICE. LA SEGURIDAD DEL LÁSER

Los láseres no son los temibles instrumentos de destrucción que los autores de ciencia-ficción han imaginado. En realidad, muchos de ellos se utilizan para curar enfermedades. Sin embargo su uso indebido puede ser perjudicial.

Desde el punto de vista práctico su mayor peligro no es el del haz de luz sino el del alto voltaje necesario para producirlo. Las unidades de alimentación de los láseres pueden generar una combinación de voltaje y corriente lo suficientemente elevada para causar la muerte y en realidad tres o cuatro investigadores han fallecido electrocutados. No se trata de un peligro exclusivo de los láseres sino de todos los equipos de alta tensión.

La exposición indebida a la luz de los haces con los que es posible que uno llegue a encontrarse puede en el peor de los casos perjudicar la vista, debido a que si bien su potencia es muy baja se concentra en un punto de reducidísimas dimensiones. La intensidad del haz de luz de un láser de baja potencia como los que suelen tener en los laboratorios de física de las escuelas es similar a la de la luz solar. Además, la luz del láser se desplaza en forma de haz de rayos paralelos. Puede ser tan peligroso mirar hacia el sol como hacia un láser. El verdadero riesgo no estriba en la exposición momentánea, sino en permitir que el haz permanezca durante algún tiempo focalizado sobre el mismo punto de la retina.

Aunque real, el peligro no es grande. A lo largo de los veinte años transcurridos desde la aparición de los primeros láseres, sólo unos veinte casos de accidentes que han provocado lesiones en los ojos se han declarado al gobierno federal de Estados Unidos. En algunos de dichos casos el daño no fue permanente, y en prácticamente todos ellos se podrían haber evitado las consecuencias, mediante medidas de seguridad rudimentarias, como el uso de gafas de protección que impiden el paso de la luz de la longitud de onda utilizada.

Existen normas de seguridad voluntarias y otras de carácter obligatorio. En Estados Unidos, las más importantes entre las voluntarias son las dictadas por el American National Standards Institute, y consisten en un

código de conducta recomendado para su uso en los laboratorios e industrias donde utilicen láseres.

La organización denominada Occupational Safety and Health Administration (OSHA) no ha tomado acción alguna desde la publicación de sus proposiciones de normas hace ya varios años. A pesar de tratarse de las reglas vigentes y de que la OSHA es el único departamento federal autorizado para dictaminar normas de cumplimiento obligatorio referentes al *uso del láser,* no las ha mejorado en la práctica, por creer que hay cosas de mayor importancia que la seguridad del láser.

El departamento federal que mayor interés ha mostrado en establecer normas para la seguridad del láser es el Bureau of Radiological Health (BRH), cuya autoridad abarca los fabricantes, pero no a los usuarios. Entre los industriales predomina la opinión de que las normas del BRH son innecesariamente rigurosas, exigen demasiado papeleo, con lo que encarecen el precio de los instrumentos y en algunos casos impiden el uso de láseres. Una de las empresas más importantes de Estados Unidos, al parecer, ha ordenado a sus ingenieros que reduzcan al mínimo el uso de los láseres con el fin de evitar el correspondiente papeleo.

Las normas vigentes en diversos estados van desde cero hasta las sumamente rigurosas. Entre las últimas, se cree que se encuentran las del estado de Nueva York, donde es preciso disponer de un permiso especial incluso para manejar un pequeño láser de helio-neón. El BRH intenta coordinar un código estandarizado, aunque, por el momento, el progreso realizado ha sido mínimo.

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

1. El Universo desbocado. *Del big bang a la catástrofe final.* Paul Davies
2. Gorilas en la niebla. *Trece años viviendo entre gorilas.* Dian Fossey
3. Dormir y soñar. *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
4. Superfuerza. Paul Davies
5. Las raíces de la vida. *Genes, células* y *evolución.* M. Hoagland
6. Microelectrónica. *Las computadoras* y *las nuevas tecnologías.* Stefan M. Gergely
7. El telar mágico. *El cerebro humano* y *la computadora.* Robert Jastrow
8. De los átomos a los quarks. James S. Trefil
9. El gen egoísta. *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
10. ¡Que viene el cometa! Nigel Calder
11. Las plantas. *«Amores* y *civilizaciones» vegetales.* Jean-Marie Pelt
12. La frontera del infinito. *De los agujeros negros a los confines del Universo.* Paul Davies
13. La verdadera historia de los dinosaurios. Alan Charig
14. Izquierda y derecha en el cosmos. *Simetría* y *asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo.* Martin Gardner
15. Ecología humana. *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell
16. Introducción a la química. Hazel Rossotti
17. Sol, lunas y planetas. Erhard Keppler
18. Caníbales y reyes. *Los orígenes de la cultura.* Marvin Harris
19. Naturalistas curiosos. Niko Tinbergen
20. En busca del gato de Schródinger. *La fascinante historia de la mecánica cuántica.* John Gribbin
21. La mente I. Anthony Smith
22. La mente II. Anthony Smith
23. En la senda del hombre. *Vida* y *costumbres de los chimpancés.* Jane Goodall
24. La evolución de la física. Albert Einstein y Leopold Infeld
25. El universo de Stephen Hawking. John Boslough

26. Un dios interior. *El hombre del futuro como parte de un mundo natural*. René Dubos
27. Rompecabezas y paradojas científicos. Christopher Jargocki
28. Otros mundos. *El espacio* y *el Universo cuántico.* Paul Davies
29. El ídolo de silicio. *La «revolución» de la informática* y *sus implicaciones sociales.* Michael Shallis
30. Los rituales amorosos. *Un aspecto fundamental en la comunicación de los animales.* Eberhard Weismann
31. El momento de la creación. *Del big bang hasta el Universo actual.* James S. Trefil
32. Informática para todos. Peter Laurie
33. Cómo se comunican los animales. Heribert Schmid
34. Cien mil millones de soles. *Estructura* y *evolución de las estrellas.* Rudolf Kippenhahn
35. Cazadores de microbios. Paul de Kruif
36. Dios y la nueva física. Paul Davies
37. La inestable Tierra. *Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales.* Basil Booth y Frank Fitch
38. El legado de Darwin. Brian Leith
39. El panorama inesperado. *La naturaleza vista por un físico.* James S. Trefil
40. Fórmulas del éxito en la Naturaleza. *Sinergética: la doctrina de la acción de conjunto.* Hermann Haken
41. El escarabajo sagrado I. V *otros grandes ensayos sobre la ciencia.* Martin Gardner
42. El escarabajo sagrado II. V *otros grandes ensayos sobre la ciencia.* Martin Gardner
43. Evolución. *Teorías de la evolución de la vida.* Wolfgang Schwoerbel
44. Iniciación a la meteorología. Mariano Medina
45. La explosión de la relatividad. Martin Gardner
46. Leyendas de la Tierra. Dorothy Vitaliano
47 La lógica de lo viviente. François Jacob
48. Génesis. *Los orígenes del hombre y del Universo.* John Gribbin
49. Miscelánea matemática. Martin Gardner
50. La Tierra en movimiento. John Gribbin
51. Los sonámbulos I. *El origen y desarrollo de la cosmología.* Arthur Koestler

52. Los sonámbulos II. *El origen y desarrollo de la cosmología.* Arthur Koestler
53. En busca de la doble hélice. *La evolución de la biología molecular.* John Gribbin
54. La creación. P. W. Atkins
55. Patrones y pautas en la naturaleza. Peter S. Stevens
56. El Universo accidental. Paul Davies
57. Doce pequeños huéspedes. *Vida y costumbres de unas criaturas «insoportables».* Karl von Frisch
58. El clima futuro. John Gribbin
59. Cerebro y psique. Jonathan Winson
60. Claves ciertas. *Física cuántica, biología molecular y el futuro de la ciencia.* Gerald Feinberg
61. El envejecimiento. David P. Barash
62. Instantáneas matemáticas. Hugo Steinhaus
63. Amor y odio. *Historia natural del comportamiento humano.* I. Eibl-Eibesfledt
64. Evolución humana. Roger Lewin
65. Las flechas del tiempo. *Una visión científica del tiempo.* Richard Morris
66. El amanecer cósmico. *Orígenes de la materia y la vida.* Eric Chaisson
67. Biotecnología. *La nueva revolución industrial.* Steve Prentis
68. La construcción de la era atómica. Alwyn McKay
69. Guerra y paz. *Una visión de la etología.* I. Eibl-Eibesfeldt
70. Matemáticas e imaginación I. E. Kasner y J. Newman
71. Matemáticas e imaginación II. E. Kasner y J. Newman
72. La vida, un estadio intermedio. Carsten Bresch
73. Biografía de la física. George Gamow
74. El rayo láser. J. Hecht y D. Teresi
75. Darwinismo y asuntos humanos. Richard Alexander

EL RAYO LASER
J. HECHT/ D. TERESI

Los rayos láser son tal vez el hallazgo más asombroso de la moderna tecnología. Relacionados con la mitología contemporánea, desde el "rayo de la muerte" de H.G. Wells hasta el terrible "sable de luz" de "La guerra de las galaxias", son un misterio para el profano. Este libro se propone aclarar ese misterio. Los láser se aplican a tecnologías tan dispares como el armamento más sofisticado (detección y destrucción de satélites-espías, por ejemplo), la microcirugía, el control de calidad de productos industriales, la obtención de imágenes tridimensionales (hologramas) y la reproducción musical de los discos "compactos".

En un reportaje que en algunos momentos alcanza el suspense de una novela policíaca, Jeff Hecht y Dick Teresi, reconocidos especialistas en el tema, exponen en términos claramente comprensibles la naturaleza y la breve historia de esta superherramienta del porvenir. De él se deduce que el láser, o, mejor aún, los láser —pues hay muchos tipos de diferente aplicación—, serán los casi mágicos protagonistas de la revolución tecnológica que acaba de empezar.

